



TITLE:

# 都市防災計画のシステム化に関する研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

小林, 正美

---

CITATION:

小林, 正美. 都市防災計画のシステム化に関する研究. 京都大学, 1977, 工学博士

ISSUE DATE:

1977-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k1958>

RIGHT:



# 都市防災計画のシステム化に関する研究

昭和52年5月

小林正美



# 都市防災計画のシステム化に関する研究

昭和52年5月

小 林 正 美





## はじめに

この研究は、都市防災計画のシステム化の方法論を扱ったものであり、特に、大地震時に発生する同時多発の火災に対する防災対策について、その合理的な計画法の確立を目的としたものである。また、計画の評価関数には、「安全性の確保に関する信頼度」をとりあげており、シミュレーションモデルを用いた方法と対比させながら、確率論的な立場からその定式化を試みていることが、本研究の特徴となっている。

論文は、各3章からなる2部より構成されており、第1部では、計画のシステム化及び評価方法についての理論的な考察を行っている。

まず第1部第1章では、対象を「システム」としてとらえる場合の一般的な問題点を論じた後、都市の防災計画に属する種々の対策について、そのシステムとしての性格、及び全体構成を説明している。次に、その構成をもとにした、火災の延焼と人々の避難との状態推移の相互関係から、人々の安全がどの程度確保されるかの確率（信頼度）が、対象地区の平均延焼時間と、人々がその地区外の安全域に達するまでの平均避難時間の関数として表わしうることを理論的に証明しており、それを安全度評価式と称して、都市防災計画の評価関数に用いている。

第2章では、第1章で示した都市の防災システムについてのシミュレーションモデルを作成した上、前章で求めた安全度評価式について、シミュレーションより得られる値をもとに、その実用式としての検証を行っている。また、重回帰分析の方法により、モデルで用いた各変数の安全度に対する感度解析を行っており、具体的な防災対策となる防火帯による地区分割の効果についても、同じくシミュレーションを用いた方法により、その考察を行っている。

第3章では、地区の平均延焼時間の算出、及び防火帯により地区を分割した場合の効果予測について、各々、組合せ理論にもとづいた定式化を行っており、これと安全度評価式とを併用することにより、対象地区の安全度を解析的に算定しうることを示している。

第2部では、ケーススタディとして京都市を対象とした防災計画について論じており、火災発生の分布予測や広域避難計画の可能性、及び延焼危険に対する安全度評価などの項目について、解析した例を示している。

第2部第1章では、過去の3年間に京都市で発生した通常火災の地区別発生件数について、地域特性を表わす要因を説明変数にとり入れ、数量化Ⅰ類を用いた回帰分析を行っている。解析に先立ち、各変数値を3年間の時系列的変動を考慮した測定尺度で計測し直しており、重相

---

関係数及びカテゴリー数を比較しながら、回帰モデルの選択・決定を行っている。

第2章では、京都市の元学区に含まれる地域を対象とした、広域的な避難計画の可能性を検討しており、シミュレーション技法を用いた計画法の解説を中心にしながら、最適な計画解の算出を試みている。

第3章では、京都市の三条地区を対象にして、地震時の出火件数を推定しており、それをもとに、火災の延焼と人々の避難を含むシミュレーションを行って、地区の安全度を計算している。また、第1部第2章と同様に、シミュレーションより得られる値をもとにして、安全度評価式の検証、及び各変数の感度解析なども、あわせて行っている。

# 目 次

はじめに

第1部 都市防災計画のシステム化に関する理論的考察 .....	1
第1章 都市防災システム	
ー計画のシステム化とその評価関数ー .....	2
1. 概 説 .....	2
2. システム一般について .....	2
2-1 構成に関する問題点 .....	2
2-2 システムの評価尺度 .....	4
3. 都市防災システム .....	6
3-1 システムの目的 .....	8
3-2 システムの区別 .....	8
3-3 システムの評価値 .....	9
4. 防災システムの評価関数 .....	10
4-1 信頼度の算出 .....	10
4-2 アベイラビリティ .....	14
5. ま と め .....	16
第2章 防災システムのシミュレーション	
ーシミュレーションによる安全度の算出ー .....	18
1. 概 説 .....	18
2. シミュレーションモデル .....	18
2-1 出火モデル .....	18
2-2 延焼モデル .....	21
2-3 避難モデル .....	24
2-4 評価モデル .....	25
3. シミュレーションによる解析 .....	25

3-1 安全度評価式の検証 .....	26
3-2 各変数の感度解析 .....	29
3-3 防火帯による地区分割の効果 .....	33
4. ま と め .....	38

### 第3章 安全度評価方法の定式化

ー組合せ理論による安全度の算出ー .....	40
1. 概 説 .....	40
2. 平均延焼時間の算出 .....	40
2-1 平均延焼距離 .....	41
2-2 分割メッシュの違いによる延焼距離の変動 .....	42
2-3 シミュレーションによる平均延焼時間との比較 .....	44
3. 安全度の算出 .....	47
3-1 避難時間の扱い方 .....	47
3-2 シミュレーションによる安全度との比較 .....	47
4. 地区分割の効果に対する確率的考察 .....	48
4-1 延焼危険の算定 .....	48
4-2 出火件数の減少予測 .....	51
5. 評価式にもとづく計算例 .....	52
6. ま と め .....	54

## 第2部 ケーススタディ・京都市防災計画 .....

### 第1章 京都市における火災発生密度

ー火災発生密度の回帰分析による研究ー .....	58
1. 概 説 .....	58
2. 回帰モデルについて .....	58
3. 変数値の作成 .....	60
3-1 基準変数の作成 .....	60
3-2 説明変数の作成 .....	60
4. 回帰式の決定 .....	66

5. 結果の考察 .....	68
6. ま と め .....	68

## 第2章 京都市広域避難計画

ー都市域における避難計画の研究ー .....	70
1. 概 説 .....	70
2. 基礎データの作成 .....	71
3. モデルの作成 .....	73
3-1 避難群集流動シミュレーションモデル(EES) .....	73
3-2 避難地選定モデル(DSD) .....	75
3-3 最適避難計画モデル(EES+DSD) .....	77
4. シミュレーションの実行 .....	80
4-1 STEP 1(非計画時シミュレーション) .....	80
4-2 STEP 2(STEP 1の到着地による計画) .....	81
4-3 STEP 3(最適避難計画解) .....	83
5. アウトプットのグラフィック化 .....	88
6. ま と め .....	91

## 第3章 京都市三条地区の安全度評価シミュレーション

1. 概 説 .....	93
2. 対象地域 .....	93
2-1 領域の設定 .....	93
2-2 地域の構造分類 .....	94
2-3 気象条件 .....	95
2-4 出火件数の推定 .....	97
3. 延焼モデル .....	101
3-1 延焼現象のモデル化 .....	101
3-2 アウトプット .....	103
4. 安全度評価モデル .....	106
4-1 避難モデル .....	106
4-2 評価モデル .....	106

5. シミュレーション .....	107
5-1 代表値によるシミュレーション .....	107
5-2 変動値によるシミュレーション .....	108
6. 安全度評価式の検証 .....	109
7. 感度解析 .....	111
8. ま と め .....	114
おわりに .....	115
付 録 .....	117
1. 浜田式について .....	117
2. 出火確率 $P_k(n, r)$ の一覧表 .....	121
3. 京都市広域避難計画最終案 .....	124
4. リアルタイムシステムによる最短経路選択モデル .....	133
発表論文目次 .....	140
英文抄録 .....	142

## 第1部 都市防災計画のシステム化に関する理論的考察

この研究は、火災に対する都市の防災計画について、その計画としての評価方法の確立を目的としたものであり、ここでは評価値の定量化及び算出方法についての理論的な考察を行う。

一般に、計画の評価というものは、計画が実際に運用された場合に、その目的をどれだけ達成できたかにより判断されるものである。本研究では、火災から人々の安全を計るために行われる一連の活動（計画）を「システム」としてとらえており、システムの目的（安全の確保）がどの程度の信頼性（確率）で遂行されるかにより、計画の評価を行ってみた。なおこの信頼性（有効性  $E$ ）の他に、火災による人命および物的な損害についての経済的な評価を行い、それを防ぐための対策を実施するのに必要な投資や、防災施設の維持、運用、保全等に関する費用も加えて、総コスト  $C$  を算定することができれば、システムの評価関数に、経済的な効率を表わすコスト有効性（cost effectiveness） $E/C$  を採用することも可能である。しかしこの研究では、人命等の経済的な評価の難しさからまず分子の方の有効性のみに着目し、評価関数には「安全性の確保に関する信頼度」をとりあげ、その最大化を目的として防災計画のシステム化を行ってみた。



# 第1章 都市防災システム

## — 計画のシステム化とその評価関数 —

### 1. 概 説

一つの建築物または都市を対象として、その防災計画を論じる場合に、これを「システム」としてとらえ、その信頼性や有効性を「定量的」に求めようとする研究が最近盛んになりつつある。従来この分野の研究としては、1972年に寺井俊夫氏らが建築物の火災に対する総合的な安全性について、これをシステムとしてとらえ、上記の方法による研究<sup>1)</sup>を発表されたのが最初と思われる。同研究は、各サブシステムの動作状態の組合せにより決定されるシステムの状態の中から、許容される異なった正常状態をすべて拾い出し、その確率の和から系全体の信頼度を求める方法に当るもので、サブシステムの信頼度（有効度）を独立に設定できるとした場合の、感度解析の問題についても論じてある。一方この研究では、都市的規模の火災の延焼、及び人々の避難という、時系列的な状態変化をもとにしたシステムを考えていることから、システムの信頼性を時間の関数としての確率で表わすことを目的としており、サブシステムとした各対策相互間の独立性に留意しながらシステムを構成している。また信頼度の算出には、各サブシステムについて修理系、非修理系の区別を行い、系がとりうる状態図（シャノン図）から得られる推移確率行列により、正常状態の確率を計算する方法を用いている。

### 2. システム一般について

#### 2-1 構成に関する問題点

ある複雑な対象をシステム、すなわち「所定の目的を果たすべく、選定され配列され、連系して動作する一連の構成要素の組合せ」<sup>2)</sup>としてとらえ、その統合制御及び最適化を目的とする場合には、それを階級制システムとか、多レベル制御システムとして扱うことが有効な方法である。階級制システム（hierarchical system）とは、上下関係のある命令系統のシステムの一般的表現であり、階級制を構成する要因には、1. システムの分割、2. 制御機能の分割、3. 目的の分割、がある<sup>3)</sup>。また多レベル制御システム（multilevel control system）とは、システムまたはプロセスの分割と、命令系統のピラミッド型構成からなる階級制制御システムの名称である。いずれにせよ根本の考え方としては、システムの分割によって複雑な全体的制御

問題をいくつかのよりやさしい部分的制御問題のグループに分けて、最適化制御の実現性を期待するわけであるが、そのためには当然分割された部分的問題は相互に調整されなければならない、個々のサブシステムが勝手に最適化を行って、全体として最適になることは一般にない。このような問題、すなわちトータルシステムに対してある全体的目的 (overall goal) が与えられ、サブシステムに対してはそれ固有の部分的目的 (sub goal) が与えられており、すべてのサブシステムがある制約式により相互に関連づけられている場合の最適化というものは、見方を変えれば、全体的な目的関数から、いかに合理的にサブシステムの目的関数を設定するかという問題になる。これは単に問題解法のための、「全体的目的とシステム方程式をサブシステムとその方程式に分割する」、いわゆる分割法とは本質的に異なり、むしろ現実に存在するサブシステム固有の目的関数を、システム全体の目的の中でいかに価値づけるかということであり、部分的最適化をいかに統一するかが問題となる。これに対しては、部分的目的関数の最大化が全体的目的関数の最大化に連がるようにすること、すなわち各サブシステムの目的関数  $J_i$ ,  $i = 1 \sim n$  の最大化が、全体的目的関数  $J$  の最大化とほぼ等価であるようなシステムにすることが有効な方法である。つまりこれは、システムを構成する際に、サブシステム間に干渉が少なく、 $J_i$  の最大化が  $J$  の最大化とほぼ等価か比例関係になる様なものを考えることで、一般には、 $J$  が  $\sum_{i=1}^n J_i$  に完全に分割される (独立性を有す) 場合が、一番問題ないといわれている。従って、システム全体の目的達成を部分目的の最適化から行うためには、相互に干渉がないようにして、各サブシステムの目的関数を作成する必要がある、これには、そのサブシステムで任意、独立に決定できる操作変数で、その目的関数を表わせる場合が一番良い。しかし現実の問題では、あるシステムの状態を決定するのに、外部から入ってくる独立変数でそこでは制御できない外乱変数というものが、不可欠となる場合が多い。これには、システムの評価の際に、外乱が一定値を持続するという仮定がおければ、同じく外部から干渉がない状態としてシステムを扱うことができるが、一般には、評価関数に外乱に関する期待値を選ぶなど、統計的な定式化を考えることがよく行われる。都市の防災システムでは、火災の発生や延焼に影響を与える、地震や気象条件などの自然的要因の扱いが難しく、これらの変動により計画の評価値が大きく変わってしまう場合には、評価を問うこと自体あまり意味がない。しかしそれらの外乱変動があることを前提として、計画の所望値を設定することは可能であり、一般には、計画における安全率という考え方から、過去においてある確率年数をもって発生した、危険度の高い状態を想定して計画をたてることがよく行われる。なおこの場合、その確率年数自体が、計画立案に用いたシステム間の関係性や、固定とした外乱等の持続期間と共に、計画の耐用年数として制限を加えてくることに注意すべきである。

## 2-2 システムの評価尺度

システムが、与えられた目的をどの程度達成できたかを計測できれば、システムの評価を行うことができる。ここではシステムが要求された機能を故障なく実現する確率である信頼度を、評価尺度のベースとして評価値の定量化を考える。そのためには、システムの修理系、非修理系の区別が必要となり、このうち「修理系」とは、故障から修復への状態変化が可能な系を意味し、また「非修理系」とは、正常から故障への状態変化のみが可能な系のことである。なお、この故障あるいは正常という状態判断は、システムがその目的（機能）を遂行しているか否かで決定されるものである。

次に、信頼性を計測するための客観的な尺度としては、以下に述べる3つの基本的な確率があり、いずれも時間の関数である。

### ① 信頼度 (reliability) : $R(t)$

信頼度は、システムが規定の条件下で、意図する期間中、規定の機能を遂行する確率で、時間  $t$  軸上に意図する時間を規定し、その時点で全体の何%が無故障でいるかを示すものである。

### ② 保全度 (maintainability) : $M(\tau)$

保全度は、修理可能なシステムが規定の条件において保全が実施される時、規定の時間内に保全を終了する確率で、保全時間  $\tau$  軸上、すなわち故障発生点を原点として、そこからある規定時間  $\tau$  ( $\tau \ll t$ ) までに、全体の何%が修復されているかを示すものである。

### ③ アベイラビリティ (availability) : $A(\tau, t)$

これは、修理可能なシステムが、ある特定の瞬間に機能を維持している確率で、①と②が同時に要求される修理系における広義の信頼度であり、稼働率ともいうべき確率である。

またこれらを、上記のように時間の関数の確率としてではなく、時間の平均値で表わしたものととしては、次のような尺度がある。

①' 信頼度  $R$  に関係するものとしては、平均無故障時間、MTTF (mean time to failure) と MTBF (mean time between failures) があり、前者は非修理系の平均寿命、後者は修理系の、故障と故障との間の無故障時間の平均を表わすものである。

②' 保全度  $M$  に関するものとしては、平均修復時間（動作不可能時間）を表わす MTTR (mean time to repair) あるいは MDT (mean down time) がある。

③' アベイラビリティは、 $R$  と  $M$  との関数であることからこれらの時間の比の形の稼働率で表わされ、時間あるいは定常アベイラビリティとして、次の  $A$  で与えられる。

$$A = \frac{(\text{動作可能時間})}{(\text{動作可能時間} + \text{動作不可能時間})}$$

$$= \frac{\text{MTBF}}{(\text{MTBF} + \text{MTTR})} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

この他、同じく信頼性を測る尺度としては、「率」を用いた「故障率： $\lambda(t)$ 」，「修復率： $\mu(\tau)$ 」などがあるが、これらは  $n$  個中何個不良かという相対比率（％）で測るものではなく、単位時間当たり何％故障が発生するか、あるいは修復されるかという形で表わされ〔1/時間〕を単位として持つものである。したがって、 $\lambda(t)$ は、MTTF, MTBF の逆数に相当するような尺度であり、また  $\mu(\tau)$ は MTTR の逆数にあたる尺度である。但し、MTTF, MTBF, MTTR などは平均値であって一定値であるが、 $\lambda(t)$ や  $\mu(\tau)$ は一般に時間の関数である。

ここで信頼度  $R(t)$ について、その排反事象の確率となる不信頼度  $F(t)$ や、さらにそれを微分した故障密度関数  $f(t)$ 、及び  $\lambda(t)$ との相互関係を式であらわすと次のようになる。

$$R(t) + F(t) = 1 \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

$$f(t) = dF(t)/dt = -dR(t)/dt \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) = \{-dR(t)/dt\}/R(t) \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

すなわち、 $f(t)$ は全体に対する  $R(t)$ の時間的減少率（スピード）であるが、 $\lambda(t)$ の方は、 $t$ という時点まで生き残っている  $R(t)$ の減少率  $f(t)$ を問題にしている。つまり、 $\lambda(t)$ は  $t$ まで残存している  $R(t)$ のうち、次の単位時間にどれほど故障していくかを示しており、 $R(t)$ という条件付きの  $f(t)$ と言える。この(1.4)式はさらに次のように変形されて、(1.7)のような関係式が得られる。

$$dR(t)/R(t) = -\lambda(t) \cdot dt \quad \dots\dots\dots (1.5)$$

$$\log_e R(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt \quad \dots\dots\dots (1.6)$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad \dots\dots\dots (1.7)$$

同様に、保全度  $M(\tau)$ についても、その修復率  $\mu(\tau)$ との関係は次のようになる。

$M(\tau)$ は、ある規定時間  $\tau$ までに全体の何％が修復しているかを示しており、従っていまだ故障しているものの割合は、次の  $\bar{M}(\tau)$ で表わされる。

$$\bar{M}(\tau) = 1 - M(\tau) \quad \dots\dots\dots (1.8)$$

$\mu(\tau)$ は、 $\tau$ まで故障している  $\bar{M}(\tau)$ のうち、次の単位時間にどれだけ修復していくかを示す値となることから、次の(1.9)式で与えられ、これを変形して(1.11)式が得られる。

$$\mu(t) = \{ dM(\tau)/d\tau \} / \bar{M}(\tau) \quad \cdots \cdots \cdots (1.9)$$

$$d\bar{M}(\tau)/\bar{M}(\tau) = -\mu(\tau)d\tau \quad \cdots \cdots \cdots (1.10)$$

$$\bar{M}(\tau) = e^{-\int_0^\tau \mu(\tau)d\tau} \quad \cdots \cdots \cdots (1.11)$$

従って  $M(\tau)$  との関係式は次の (1.12) で与えられる。

$$M(\tau) = 1 - e^{-\int_0^\tau \mu(\tau)d\tau} \quad \cdots \cdots \cdots (1.12)$$

次に、平均値である MTTF と  $f(t)$ 、 $R(t)$  とは次の様な関係で結ばれている。まず MTTF は故障時間の平均値から次の (1.13) 式で表わされる。

$$MTTF = E(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt \quad \cdots \cdots \cdots (1.13)$$

これを部分積分により書き換えると次式が求まる。

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad \cdots \cdots \cdots (1.14)$$

なお故障率  $\lambda(t) = \lambda$ 、(一定) で、信頼度が指数分布に従う場合には、 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 、 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$  となり、MTTF は次のようになる。

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad \cdots \cdots \cdots (1.15)$$

同様に、MTTR と  $M(\tau)$  の関係は (1.16) のようになり、 $\mu(\tau) = \mu$ 、(一定) で  $M(\tau) = 1 - e^{-\mu\tau}$  の場合、MTTR は (1.17) のようになる。

$$MTTR = \int_0^{\infty} \bar{M}(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} (1 - M(\tau)) d\tau \quad \cdots \cdots \cdots (1.16)$$

$$MTTR = \int_0^{\infty} e^{-\mu\tau} d\tau = \frac{1}{\mu} \quad \cdots \cdots \cdots (1.17)$$

### 3. 都市防災システム

ここで考える都市の防災システムは、その全体の構成が図 1-1 に示すように、大別して  $S_1$ 、 $S_2$  および  $S_3$  の 3 つのサブシステムから成り立つものである。システム全体の目的は、火災から人々の安全を確保することであり、その領域は、出火および延焼防止を意図した事前の都市計画から、実際に火災が発生したときに、できるだけ短時間に消火、避難を完了させて、再び人々を安全な状態に導けるような体制までを含むものである。従って、このシステムが設定さ

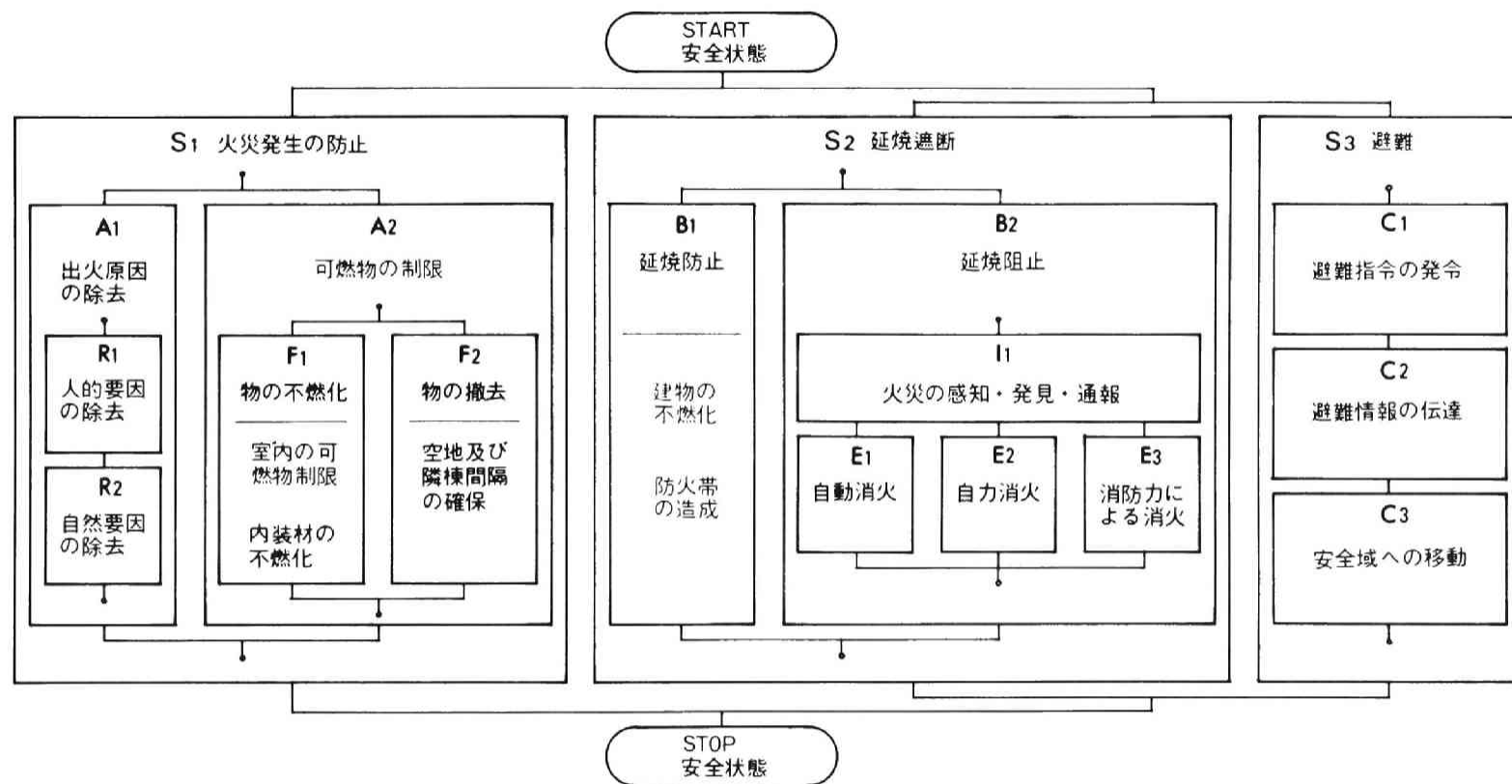


図1-1. 都市防災システム

れる地域では、いつも START から STOP への流れのうち、どれかが満足されていて人々の安全が守られている必要がある。

### 3-1 システムの目的

各サブシステムの目的および内容は次のようになる。「(S<sub>1</sub>) 火災発生の防止」は、出火自体の可能性をなくすことを目的としており、並列なシステム「A<sub>1</sub> 出火原因の除去」および「A<sub>2</sub> 可燃物の制限」から成っている。A<sub>1</sub> はさらに直列なシステム「R<sub>1</sub> 人的要因の除去」および「R<sub>2</sub> 自然要因の除去」に分割され、R<sub>1</sub> は人間の不注意による出火原因を除くことであり、R<sub>2</sub> は地震、噴火や気象条件等の自然力による原因を除くことである。一方、可燃物の制限はさらに 2 つの並列なシステム「F<sub>1</sub> 物の不燃化」および「F<sub>2</sub> 物の撤去」に分割され、F<sub>1</sub> は現に使用している物の機能を存続させたまま不燃化を行い、着火の可能性をなくすことを意味し、F<sub>2</sub> は可燃物の存在自体をなくすことである。

「(S<sub>2</sub>) 延焼遮断」は、火災発生の防止ができなかった時に、延焼が広がるのを出来るだけ少なくすることを目的とするシステムで、さらに「B<sub>1</sub> 延焼防止」と「B<sub>2</sub> 延焼阻止」との並列なシステムに分割される。B<sub>1</sub> は建物の不燃化やその集積としての防火帯、防災街区等により、延焼の防止を目的とするものであり、B<sub>2</sub> はいわゆる消防力や消火設備により延焼をくい止めることを目的としており、システムとしてはさらに「火災の感知・発見・通報」と、それにつながる「自動消火」、「自力消火」、「消防力による消火」に分割される。

「(S<sub>3</sub>) 避難」は、火災状況により広域的な避難が必要な時に、避難地として指定されている安全域へ、できるだけ短時間に全員を移動させることを目的とするシステムである。それはさらに 3 つの直列なサブシステム、「C<sub>1</sub> 避難指令の発令」、「C<sub>2</sub> 避難情報の伝達」、「C<sub>3</sub> 安全域への移動」に分割され、C<sub>1</sub> は広域避難が必要とされた時、出来るだけ早くその指令を出すこと、C<sub>2</sub> はその情報を全員に出来るだけ早く知らせること、また C<sub>3</sub> は指令を受けた後、出来るだけ短時間に安全域への移動を完了することを目的とするものである。

### 3-2 システムの区別

ここでは各サブシステムについて、修理系、非修理系の区別を行い、システムとしてどのような構成になっているかを解説する。

「(S<sub>1</sub>) 火災発生の防止」は、常に動作しているシステムであり、ある時点で発生した火災に対して効果が発揮できなかったとしても、次の発生防止には効果が期待できる。しかし一つの火災を対象に考えれば、防止が出来ずに出火してしまうと、もう元の状態に戻すことはできな

いので非修理系である。

「(S<sub>2</sub>)延焼遮断」は、出火後に動作が考えられるシステムで、目的が延焼を防ぐことからして、たとえ消火が完了して鎮火できたとしても、延焼して焼失してしまったものは元に戻すことはできない。従って非修理系である。

「(S<sub>3</sub>)避難」は、出火直後には全員が避難していない状態から始まり、時間経過に伴って安全域への移動が完了していくシステムである。ここで避難地として指定された場所の、火災に対する安全性は、定常的に保証されているものとし、避難のシステムでは固定化された外乱変数と考える。したがって、一度避難が完了するとそこで収束状態となり、故障から修理の方向のみ許された修理系とみなすことができる。

システム全体では、「延焼遮断」と「避難」とは並列系をなし、避難は消火等の働きとは独立に行われるものとする。これは避難計画を「その時の延焼状態に対応して行われるもの」と考えるのではなく、逆に、人間が最も容易に避難できるような計画をまずたて、それがいかなる場合にも実行できるように、消防力や防火帯などをコントロールしていく、という発想に基づくものである。これら2つのシステムは、常時動作している「(S<sub>1</sub>)火災発生の防止」に対しては待機状態にあって、防止に失敗して出火した場合に、切替って人々の安全を確保するために動作するシステムと考えられる。従って、この都市の防災システムは一つの「待機冗長系 (stand-by redundancy system)」を構成しているとみなすことができる。

### 3-3 システムの評価値

各システムの目的がどの程度遂行されるか、前記の確率とか時間の尺度により表現できれば、定量的な評価が可能となる。しかし都市の防災システムでは、信頼度、故障率、修復率などの評価値が、一般の機器の部品のように、実験的かつ固定的に求められているわけではなく、システムが対象とする地域やそこでの防災計画の実施状況により当然異ってくる。ここでは、各システムの評価値がどのようにして求められるか、その算出方法について述べる。

(1) 「火災発生の防止」は、ある一定期間の出火率が不信頼度  $F(t)$  に当り、燃焼単位または地区単位のメッシュとして  $N$  個に分割した対象地域で、単位期間に  $r$  ケ所で出火があった場合、 $F(t) = r/N$  で求められる。

(2) 「延焼遮断」のシステムは、対象とした地域の延焼状態から評価値がきまり、出火から時刻  $t$  まで何個燃えずに残っているかという残存率で、信頼度  $R(t)$  を表現できる。すなわち  $N$  個の単位のうち、空地など延焼対象とならないものを除いた  $K$  個を分母として、時刻  $t$  においてまだ燃えずに残っている個数を  $n(t)$  とおいたとき、 $R(t)$  は  $R(t) = n(t)/K$  で与えられる。ま



た故障率  $\lambda(t)$  は、時刻  $t$  において丁度延焼する単位を  $r(t)$  とし、それまでに燃えずに残っていた単位数を  $m(t)$  (すなわち、 $m(t) = n(t-1)$ ) として、 $\lambda(t) = r(t)/m(t)$  で表わされる。

(3) 「避難」のシステムは、避難完了状態から評価がきまり、出火後、時刻  $t$  において、安全域に避難完了している人々の割合で保全度  $M(t)$  が与えられる。すなわち対象地域の要避難人口を  $L$  人とし、時刻  $t$  までに避難を完了している人数を  $n(t)$  とすると、 $M(t)$  は、 $M(t) = n(t)/L$  で与えられる。また修復率  $\mu(t)$  は、時刻  $t$  に丁度避難を完了する人数を  $r(t)$ 、それまでに避難を終わっていなかった人数を  $m(t)$  としたとき、 $\mu(t) = r(t)/m(t)$  で表わすことができる。

(4) 最後に、人命の安全確保を目的とする防災システム全体の評価値は、同じく対象地区の要避難人口を  $L$  人としたとき、出火後、時刻  $t$  において、延焼と避難の状態から安全である人数  $n(t)$  が求められれば、信頼度  $R(t) = n(t)/L$  で表わすことができる。

#### 4. 防災システムの評価関数

ここでは都市の防災システムのうち、実際に出火した場合に動作する「延焼遮断」と「避難」から成る部分を取り上げ、これらのシステムがある信頼性のもとに動作した場合に、系全体の目的である「人の安全の確保」がどの程度保証されるか、その信頼性を表わす評価関数の理論的な算出方法について述べる。

##### 4-1 信頼度の算出

まず簡単のために、「延焼遮断」のシステムが、故障率  $\lambda(t) = \lambda$  (一定)、したがって平均延焼時間  $MTTF = 1/\lambda$ 、信頼度  $R(t) = e^{-\lambda t}$  で遂行され、また「避難」のシステムが、修復率  $\mu(t) = \mu$  (一定)、したがって平均避難時間  $MTTR = 1/\mu$ 、保全度  $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$  で遂行された場合の問題を扱う。(図 1-2)

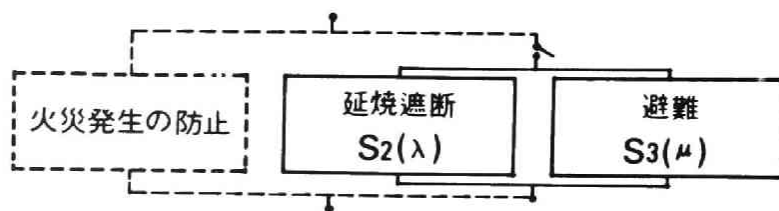


図 1-2. 防災システム (二要素並列系)

防災システムが扱う対象域のある単位において、システム  $i$  が動作している状態を  $x_i$ 、動作していない状態を  $\bar{x}_i$  で表わした場合、サブシステム  $S_2, S_3$  がとりうる状態は表 1-1 のようなものとなる。

表 1-1. 要素のとりうる状態

$S_2$	$x_2 =$ 延焼（出火）していない	○
	$\bar{x}_2 =$ 延焼（出火）している	×
$S_3$	$x_3 =$ 避難完了して、人がいない	○
	$\bar{x}_3 =$ 避難完了せず、人がいる	×

一方、系全体としてのとりうる状態、すなわちある単位がとりうる状態は、これらの組合せから表 1-2 に示す  $E_0 \sim E_3$  の 4 つの状態となり、そのうちシステム全体としての目的「人の安全の確保」が満足されているのは、 $E_0, E_2, E_3$  の 3 つの状態となる。

表 1-2. 系のとりうる状態

$E_0$	$x_2 \cdot \bar{x}_3 =$ 延焼せず、人がいる	○
$E_1$	$\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 =$ 延焼して、人がいる	×
$E_2$	$x_2 \cdot x_3 =$ 延焼せず、人もいない	○
$E_3$	$\bar{x}_2 \cdot x_3 =$ 延焼しても、人がいない	○

したがって、火災発生時を原点として、時刻  $t$  において  $E_i$  という状態にある確率を  $P_i(t)$  とすれば、防災システムとしての信頼度は、 $R(t) = P_0(t) + P_2(t) + P_3(t)$  で表わされることになり、この各確率は次のようにして算出される。

系がとりうる 4 状態間の推移確率のダイアグラムは、図 1-3 のようになり、 $\Delta t$  あたりのこの推移確率行列と、これを微分方程式の形で表わしたものを、式 (1.18), (1.19) に示す。

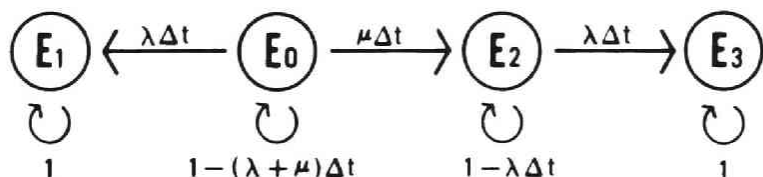


図 1-3. シャノン図

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} E_0 & E_1 & E_2 & E_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1-(\lambda+\mu) & \lambda & \mu & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\lambda & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \dots\dots\dots (1.18)$$

$$\left. \begin{aligned} dP_0(t)/dt &= -(\lambda+\mu)P_0(t) \\ dP_1(t)/dt &= \lambda P_0(t) \\ dP_2(t)/dt &= \mu P_0(t) - \lambda P_2(t) \\ dP_3(t)/dt &= \lambda P_2(t) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (1.19)$$

この連立微分方程式を、初期条件  $P_i(0)$  に対して解くことにより  $P_i(t)$  を求める。これは  $A = P - I$ ,  $sI - A$ , から初期条件  $P(0)$  のもとに  $P(s) = P(0)/(sI - A)$  を求め、 $P_i(s)$  についてラプラスの逆変換を行って  $P_i(t)$  を得るのであるが、 $t=0$  では  $E_0$  状態にあるとして、 $P(0) = (1000)$  である。次に  $(sI - A)^{-1}$  は

$$(sI - A)^{-1} = |sI - A|^{-1} \cdot \text{adj}(sI - A) \quad \dots\dots\dots (1.20)$$

の関係を用いて求めるが、 $\text{adj}(sI - A)$  は、 $P(0)$  に対応する一行目の要素  $C_{1j}$ ,  $j=1 \sim 4$  だけを計算すればよいことになり、各値は次式で与えられる。

$$|sI - A|^{-1} = \frac{1}{s^2(s+\lambda)(s+\lambda+\mu)} \quad \dots\dots\dots (1.21)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{11} &= s^2(s+\lambda), & C_{12} &= s\lambda(s+\lambda) \\ C_{13} &= s^2\mu, & C_{14} &= s\lambda\mu \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (1.22)$$

これらの値を用いて、各  $P_i(s)$  は次の (1.23) 式から求められる。

$$\begin{aligned} P(s) &= (P_0(s), P_1(s), P_2(s), P_3(s)) \\ &= |sI - A|^{-1} \cdot [C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1.23)$$

この  $P_0(s) \sim P_3(s)$  は、部分分数の公式を用いてさらに次のように展開される。

$$P_0(s) = \frac{1}{s+\lambda+\mu} \quad \dots\dots\dots (1.24)$$

$$\begin{aligned}
 P_1(s) &= \frac{1}{s(s+\lambda+\mu)} \\
 &= \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \cdot \frac{1}{s} - \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \cdot \frac{1}{s+\lambda+\mu} \quad \dots\dots\dots (1.25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_2(s) &= \frac{\mu}{(s+\lambda)(s+\lambda+\mu)} \\
 &= \frac{1}{s+\lambda} - \frac{1}{s+\lambda+\mu} \quad \dots\dots\dots (1.26)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_3(s) &= \frac{\lambda\mu}{s(s+\lambda)(s+\lambda+\mu)} \\
 &= \frac{\mu}{\lambda+\mu} \cdot \frac{1}{s} - \frac{1}{s+\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \cdot \frac{1}{s+\lambda+\mu} \quad \dots\dots\dots (1.27)
 \end{aligned}$$

ここで  $P_i(s)$  についてラプラスの逆変換を行うと、上式は次のように変形される。

$$P_0(t) = e^{-(\lambda+\mu)t} \quad \dots\dots\dots (1.28)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} - \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \cdot e^{-(\lambda+\mu)t} \quad \dots\dots\dots (1.29)$$

$$P_2(t) = e^{-\lambda t} - e^{-(\lambda+\mu)t} \quad \dots\dots\dots (1.30)$$

$$P_3(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} - e^{-\lambda t} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \cdot e^{-(\lambda+\mu)t} \quad \dots\dots\dots (1.31)$$

防災システムの信頼度は、 $R(t) = P_0(t) + P_2(t) + P_3(t)$  から、結局、次の (1.32) で求められることになる。

$$R(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \cdot e^{-(\lambda+\mu)t} \quad \dots\dots\dots (1.32)$$

なお  $E_1$  の状態が、系全体での故障状態にあたるので、不信頼度  $F(t)$  は次式で表わされることになる。

$$F(t) = P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} - \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \cdot e^{-(\lambda+\mu)t} \quad \dots\dots\dots (1.33)$$

#### 4-2 アベイラビリティ

以上のことは、防災システムを2要素並列系として、その信頼度を算出したものであるが、これは防災システム全体を、一つの要素  $S(\lambda, \mu)$  からなる修理系と考えて、そのアベイラビリティを算出した場合と全く同じ結果になる。すなわちシステムの信頼度、保全度が、(1.34)の指数分布に従う、単一要素の系(図1-4)を考える。

$$\left. \begin{aligned} R(t) &= e^{-\lambda t} \\ M(\tau) &= 1 - e^{-\mu \tau} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.34)$$

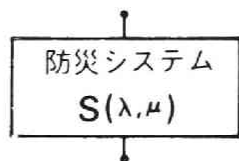


図1-4. 防災システム(単一要素)

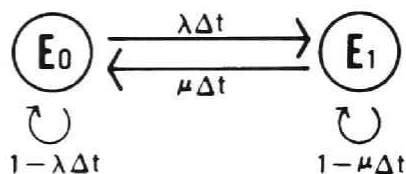


図1-5. 単一要素のシャノン図

この場合、その正常状態を  $E_0$ 、故障状態を  $E_1$  とするとシャノン図は図1-5のようになる。これから推移確率行列  $P$ 、及び連立微分方程式を求めると、式(1.35)、(1.36)のようになる。

$$P = \begin{array}{c} E_0 \quad E_1 \\ \begin{array}{cc} E_0 \left[ \begin{array}{cc} 1-\lambda & \lambda \\ \mu & 1-\mu \end{array} \right] \\ E_1 \end{array} \end{array} \dots\dots\dots (1.35)$$

$$\left. \begin{aligned} dP_0(t)/dt &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ dP_1(t)/dt &= \lambda P_0(t) - \mu P_1(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.36)$$

これを以前と同様にしてラプラスの逆変換を用いて解くと、アベイラビリティが  $P_0(t)$ 、アンアベイラビリティが  $P_1(t)$  として次式により求められる。

$$P_0(t) = A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \dots\dots\dots (1.37)$$

$$P_1(t) = \bar{A}(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \dots\dots\dots (1.38)$$

これらは、(1.32)、及び(1.33)式と全く同じ関数になる。ここで上式についてさらに考察

を加えると、これらの式の第2項は過渡項であり、 $t \rightarrow \infty$  とすると残りは第1項の定常項だけになり、これが定常アベイラビリティ  $A$ 、及び定常アンアベイラビリティ  $\bar{A}$  にあたる。

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \dots\dots\dots (1.39)$$

$$\bar{A} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} \quad \dots\dots\dots (1.40)$$

ここでアベイラビリティ  $A(t)$  と、定常アベイラビリティ  $A$  との関係は図1-6のようになることから、通常、系の評価を行う場合には、 $A$  を知れば十分である。

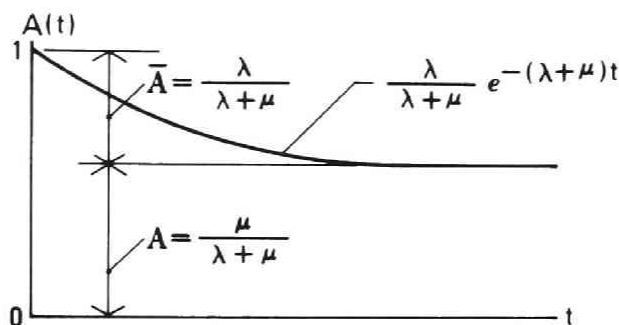


図1-6. アベイラビリティ

以上により、都市の防災システムの信頼性を計測できる評価関数が得られたことになる。ただし(1.32)や(1.37)式を算出するのに用いた、 $\lambda, \mu = \text{一定}$ 、という仮定は、一般に複雑な系の安定した稼動状態に現われるもので、故障についていえば、その発生の時間間隔がランダムな偶発故障(CFR: constant failure rate)に適用できるものである。従って、対象とする地域の特性によりその動作状態が異なる都市の防災システムにおいては、いつも成り立つものではない。しかし、図1-6からもわかるように、故障率  $\lambda(t)$ 、修復率  $\mu(t)$  の関数形は、この都市の防災システムでは、定常状態に至るまでの過渡的な段階における信頼度の時間変化を知りたい場合に必要となるもので、最終的な状態を問題にするのであれば、式(1.39)で示した定常アベイラビリティを評価関数として用いることができる。これには平均時間という代表値のみを扱えばよいので、結局、結論としては次のようにいうことができよう。

出火後に動作する都市の防災システムについて、それが最終的に何%の人の安全を確保できるかを示す評価関数は、そのシステムの働きによる、地区の延焼状態を示す平均延焼時間

(MTBF)と、地区の避難状態を示す平均避難時間(MTTR)から、修理系としての信頼性を示すアベイラビリティAにより、(1.41)式で与えられる。

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$
$$= \frac{\text{平均延焼時間}}{\text{平均延焼時間} + \text{平均避難時間}} \quad \dots\dots\dots (1.41)$$

以下、この論文では(1.41)式を安全度評価式と呼ぶことにする。

## 5. ま と め

ここでシステムとして扱った都市の防災計画では、計画自体に対する発想から、「延焼遮断」と「避難」のシステムが並列な関係になるように配置してある。そのため相互に干渉がない状態で各目的を遂行でき、システムの構成から理論的に求められた系全体の評価関数(1.41)では、対象地域の平均延焼時間の最大化と、平均避難時間の最小化をそれぞれ独立に行うことにより、系全体の最適化が得られるようになっている。この後必要とされることは、各平均時間と具体的な建築あるいは都市計画的な操作変数との対応をつけることであり、本論文では次の第2,3章においてその一部を論じているが、例えば「延焼遮断」のシステムでいえば、平均延焼時間と建物の不燃化率や防火帯の造成との関係、及び消防施設の配置の問題を含む消防力との関係であり、「避難」のシステムでいえば、平均避難時間と避難地の場所や経路との関係である。なおこの場合、「火災発生の防止」のシステムで与えられることになる建ぺい率、隣棟間隔や空地率、及び街路パターンなどの、都市の幾何学的な形態が外生変数として入ってくることになるが、何をそこでの操作変数とするかを明確にすれば、各平均時間の最適化問題も同様にしてそれぞれ独立に設定できるものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 寺井俊夫他「火災に対する建物の安全計画法に関する研究(1,2,3)」 日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和47年10月。
- 2) 猪瀬博編「システム工学」 岩波講座 基礎工学 21 岩波書店
- 3) 志水清孝「システム制御と数理計画法」 コロナ社
- 4) 塩見弘「信頼性の基礎」 コロナ社

- 5) M.L.Shooman, Probablistic Reliability : An Engineering Approach, McGraw-Hill  
1968
- 6) 高松武一郎編「プロセスシステム」 日刊工業新聞社
- 7) 鬼頭史城「演算子法とプラス変換」 ダイヤモンド社
- 8) 堀内三郎, 小林正美「都市の防災システムの信頼度に関する考察」 日本建築学会大会  
学術講演梗概集(関東) 昭和50年10月
- 9) 堀内三郎, 小林正美「火災に対する都市の防災システムの研究」 都市計画 別冊 昭  
和50年度学術研究発表会論文集(10) 日本都市計画学会 昭和50年11月
- 10) 堀内三郎, 小林正美「都市防災計画のシステム化に関する研究(I), 計画の評価に関す  
る理論的考察」 日本建築学会論文報告集 第242号 昭和51年4月
- 11) 堀内三郎「都市防火システム論」 昭和51年度研究協議会概要集, 日本火災学会 昭  
和51年12月



## 第2章 防災システムのシミュレーション —シミュレーションによる安全度の算出—

### 1. 概 説

この章では、第1章で示した都市防災システムの各内容をモデル化し、ある計画のもとで人々の安全がどの程度確保されるかを予測できる、シミュレーションモデルを作成してみた。また、第1章で求めた地区の安全度（対象地区の人々が安全である確率）を表わす評価式(2.1)について、ここで行ったシミュレーションの結果をもとに、その実用式としての検証もあわせて行っている。

$$\text{安全度} = \frac{\text{平均延焼時間}}{\text{平均延焼時間} + \text{平均避難時間}} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

さらには、重回帰分析の方法により、シミュレーションで用いた各変数の安全度を与える影響も調べており、具体的な防災対策となる、防火帯による地区分割の効果についても、同じくシミュレーションを用いた方法によりその考察を行っている。

### 2. シミュレーションモデル

都市において地震火災が発生した時の問題は、(1) 何ヶ所で火災が発生するか、(2) それがどのように延焼するか、(3) 人々はどのように避難するか、(4) 結果として何割の人の安全が確保できるか、の4段階に分けて考えることができる。これらの項目と第1章の3で示した防災システム（図1-1）との関係は、(1) には  $S_1$  の「火災発生防止」、(2) には  $S_2$  の「延焼遮断」、(3) には  $S_3$  の「避難」の各サブシステムが対応し、(4) には防災システム全体の目的が対応する。以下に、各項目についてのシミュレーションのためのモデル化を説明する。

#### 2-1 出火モデル

出火モデルでは、対象地域のどこで火災が発生するかという、出火の場所と件数の予測が最終的な目標となり、その際、モデルの変数に都市計画的な要因を組込めれば、火災発生防止を計画サイドから検討することが可能となる。以上のことを目的として、平常時の出火データ

をもとに、火災発生密度の回帰分析を行ってみた。<sup>\*1</sup>

これは京都市（228ゾーン）における3年間の出火件数から、各ゾーンの火災発生密度を求めてこれを基準変数にとり、地域特性を示す用途分類、人口密度、容積率を説明変数にして、数量化I類による回帰を行ったものである。説明変数を決定するにあたり、不燃化率は、火災発生密度との単相関が $r=0.036$ で、全く相関関係がなかったので変数からは外した。また結果は表2-1、2-2、2-3、に示す通りで、重相関係数は $R=0.548$ となり、満足できる回帰値は得られなかった。従って、この解析に基づく限り、上記の変数を用いての出火地点の予測は困難であり、都市計画的な対策で出火防止を計ることも難しい問題といえよう。

表2-1. 回 帰 係 数

アイテム	カテゴリー	ウエイト ( $\times 10^{-3}$ )	SAMPLE NO.
用途分類	1. 住居専用地区	- 13.9	67
	2. 住居地区	4.1	44
	3. 住商地区	5.2	24
	4. 住工地区	4.0	51
	5. 混合地区	- 0.2	10
	6. 中心商業地区	- 12.4	6
	7. 商業地区	21.6	12
	8. 工業専用地区	7.7	6
	9. 工業地区	24.0	8
人口密度 (人/ha)	1      0 - 50	- 8.2	14
	2      50 - 150	- 21.0	75
	3      150 - 250	3.5	90
	4      250 - 300	25.3	22
	5      300 - 350	51.6	17
	6      350 - 400	26.7	7
	7      400 - 450	- 3.6	2
	8      450 - 500	- 41.6	1
容 積 率 (%)	1      0 - 25	- 26.3	20
	2      25 - 75	- 4.6	160
	3      75 - 100	20.1	34
	4      100 - 150	30.7	13
	5      150 - 175	176.0	1

\*1 この分析の詳細は、第2部第1章「京都市における火災発生密度」に述べてある。

表 2-2. 単相関行列

アイテム	用途分類	人口密度	容 積 率	出火密度
用途分類	1.000	0.324	0.200	0.318
人口密度	0.324	1.000	0.323	0.447
容 積 率	0.200	0.323	1.000	0.406
出火密度	0.318	0.447	0.406	1.000

表 2-3. 相関係数

偏相関係数			重相関係数
用途分類	人口密度	容積率	0.548
0.181	0.315	0.294	

次に、地震時の出火に関しては、この種のデータが少ないことから、火災発生と地域特性の関連をとらえた研究はほとんどない。しかし、家屋の倒壊率と出火件数との関係を回帰したものとしては、東京消防庁により作成されたグラフ<sup>1)</sup>、及び水野氏らが行った研究<sup>3)</sup>がある。前者は、関東大地震時の出火率の調査から求められたもので、図 2-1 にこれを示す。なおこの出火率は、地震時の出火件数と木造建物棟数の比であり、またこの値を現在に適用するためには種々の修正が必要ながことが述べられている。<sup>2)</sup>

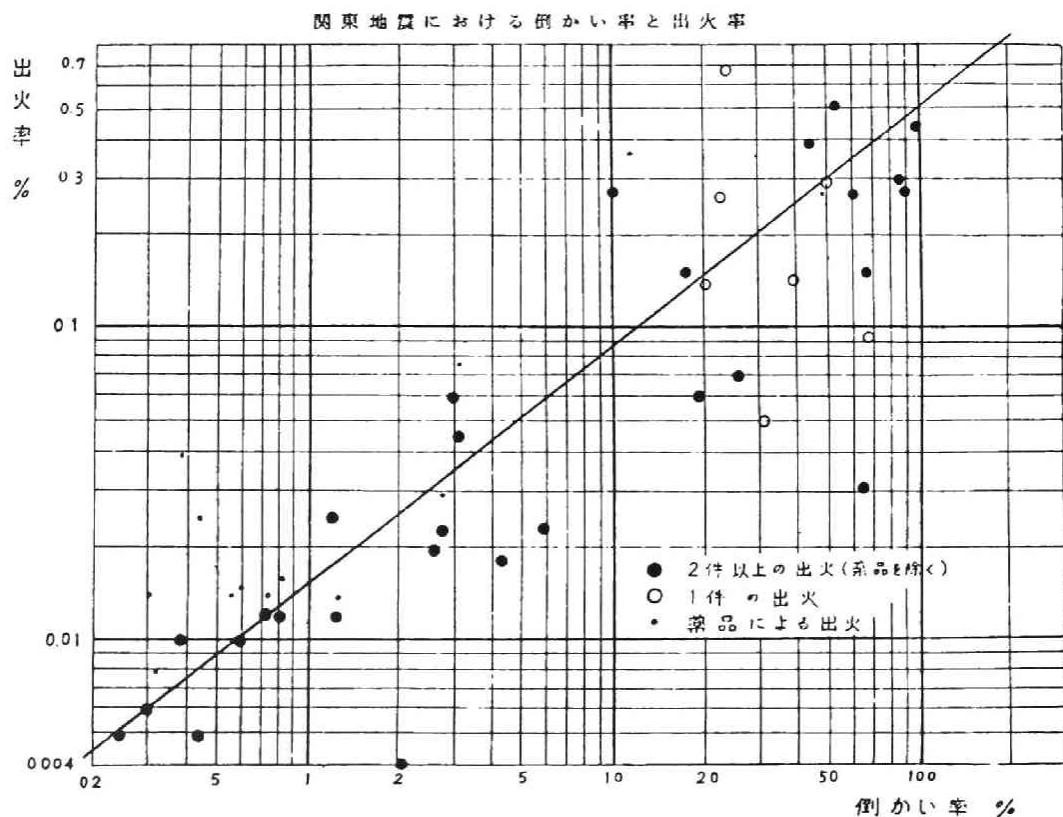


図 2-1. 関東地震における倒壊率と出火率 (文献 1) P30 より引用)

後者は、過去の12の大きな地震の調査データをもとに、地区の炎上火災の出火件数 $y$ を(2.2)式により回帰したものである。ここに、炎上火災とは全出火のうち即時消止できずに燃え広がった火災であり、また $x/N$ が倒壊率にあたる。

$$y = \alpha \cdot \beta \cdot B \cdot N \cdot (x/N)^a \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

但し

$y$  : 炎上火災出火件数

$\alpha$  : 火器使用率、夕食時(PM 5～7時)では、 $\alpha = 2.50$

$\beta$  : 季節係数、冬季では $\beta = 2.4087$  ( $\beta = e^{0.8791}$ )

$N$  : 全世帯数

$x$  : 全壊世帯数

$B, a$  : 定数、 $B = e^{-5.7597} = 0.003152$ ,  $a = 0.6041$

これらの方法を用いれば、倒壊率が決まると出火件数だけはある程度予測できる。しかし同じ規模の地震を対象としても、両者の方法の間には、算出される値にかなりの開きが生ずることが文献3)に述べられている。

以上のことから、火災の発生は都市計画的なレベルで操作できる事象とはなりえず、この都市の防災システムでは、コントロールできない外生変数(外乱)として扱うことにした。従ってこの出火モデルでは、出火件数を単なる入力データとして扱うことにし、その発生箇所も場所を特定できないことから、対象地域内の任意の地点を全く無作為に選ぶことにした。

## 2-2 延焼モデル

延焼モデルは、図1-1に示した防災システムの中の、「延焼遮断」のシステムのシミュレーションを扱うものであるが、このうち消火を目的とする「延焼阻止」のサブシステムは、地震時の場合、消防力による消火などが、交通障害等から極めて不確定な要素になることが予想される。従って、これはもしうまく動作できれば安全側に働く要素とみなすことにして、延焼モデルからは除外した<sup>\*1</sup>。しかし、それとは並列な関係に位置する「延焼防止」のシステムについては、空地や不燃建築物をメッシュで表現することにより、その効果を計測できるようにしている。すなわち、ここでは対象地区を50m角のメッシュに分割して、それを木造、不燃造、空地のいずれかに分類しており、このうち木造のメッシュでは、家屋が隣棟間隔5m以下

<sup>\*1</sup> なお、第2部第3章で後述するように、市民消火による効果は、市民消火率として出火件数に乘じ、炎上火災件数の減少で表わすことができる。

で並んでいることを前提に<sup>\*1</sup>、隣接する木造メッシュ間では必ず延焼が起これとされているが、不燃造、及び空地メッシュへの延焼はないものとした。なお、このモデルでは、上記の地区の構造データの他に、延焼速度と出火件数の2つを変数としているが、出火件数については、地震時に何件発生するかという予測の問題には触れておらず、“N件の場合には”という形式にして単なる入力データとしての扱いをした。

# (1) 延焼速度

延焼の状態は、各メッシュの中心に一つのポイントを対応させ、そこが延焼する時間で表わしている。また出火ポイントからの延焼は、メッシュに分割したことから8方向としているが、各方向の延焼速度はすべて同じにして、円形拡大による近似を行った。一般に、延焼形態が風向の影響を受けることは明らかであり、堀内博士の研究<sup>4)</sup>によれば、均質な地区において一定方向の風を受けた場合には、延焼が卵形に拡大する結果が得られている。また、風向、風速、及び家屋長と隣棟間隔のデータが得られれば、浜田博士により求められた経験式<sup>5)</sup>を用いて、風下、風上、風側の各方向の延焼時間、従って延焼速度を算出することも可能である。しかし風向はきわめて不確定な要素と考えられ、たとえ出火時の風向を予測できたとしても、長時間にわたる大規模火災では、火災自体の影響で旋風が生じたりするので、そのまま定方向を持続するという保証は得られない。これらの理由から、この延焼モデルでは、風向を変数にして方向別の延焼速度に差異をつけることはしなかった。そのかわり、風速 $v$ における最大の延焼速度を用いて各方向の延焼を行うことにし、これに浜田式の風下側延焼速度 $V$ をあてることとした。この $V$ (m/分)は、対象地区の風速 $v$  m/sec、家屋長 $a$  m、及び隣棟間隔 $d$  mが定まったとき、(2.3)式の風下側延焼時間 $t_2$ を用いて(2.4)式より得られるもので、この速度で延焼を行うことは、風向を無視したことに対しての安全側の処置といえよう。

$$t_2 = \frac{3 + 3/8 \cdot a + 8d / (5 + v/2)}{1 + 0.1v + 0.007v^2} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$V = \frac{a + d}{t_2} = (1 + 0.1v + 0.007v^2) \cdot \frac{a + d}{3 + 3/8 \cdot a + 16d / (10 + v)} \quad \dots (2.4)$$

次に、同じく浜田式によると、延焼速度自体が時間経過により段階的に増加するとされているが、このモデルではそれも一定値のままとした。これは、飛火などの影響により一般的には増

<sup>\*1</sup> 浜田式に従えば、隣棟間隔 $d$ が、風速を $v$  m/secとして、 $D = 5 + v/2$ で表わされる延焼限界距離 $D$  mより大きい場合には、延焼が起これないとしている。従って、ここでは木造メッシュに、風速が $v = 0$ のときでも延焼する距離の、 $d = 5$  m以下の地区を考えることにした。詳細は付録1「浜田式について」を参照のこと。

加することが予想されとしても、過去の大火例では、他の要因による影響のためか減少している場合もあり、<sup>6)</sup> あまり確定的なものではないとみなしたこともある。しかしそれ以上に、ここで扱うような都市的規模の火災というマクロな現象においては、そこで用いる変数もそれに相応してマクロな処理をした方が、問題の性格を見誤る危険が少ないと考えたからであり、変動幅があることを前提にした“平均的な値”という意味で、固定値を採用したものである。

なお、浜田式についての詳しい解説、及びその問題点についての考察は、付録1「浜田式について」でとりあげているのでここでは省略する。

## (2) 出火地点

出火地点に関しては、発生場所が全く不確定であるとみなしており、入力データとして与えられるn件の予想出火件数に対して、対象地区内のメッシュn個を無作為に選び出し、そのポイントから出火するとしている。但し、選んだメッシュが空地の場合は再びプロットをやり直し、不燃造の場合には出火しても延焼せずとして、木造メッシュからの出火のみにより延焼をシミュレートしている。

## (3) 延焼過程（アルゴリズム）

シミュレーションは、1分を単位とする固定時間増分法で進行させており、毎時、出火あるいは延焼するポイントを選び出し、それに隣接する木造メッシュのポイントに延焼時刻を与える操作を繰り返している。また、異なる出火点により、2つ以上のポイントから延焼時刻を与えるることになったポイントは、その中で最小の値を持つようにしており、出火メッシュから連続して並ぶ木造メッシュを、すべて燃やし尽した段階で、シミュレーションを打切っている。

## (4) 出力

延焼モデルの出力としては、まず各地点の延焼時刻（単位、分）で表わされる延焼動態図があり、この例を図2-2に示す。これは50m角のメッシュ100個からなる地区を対象としたもので、内部に×印で示した10個の不燃造メッシュを含んでおり、出火状況は、4件の火災のうち2件が不燃造メッシュで発生した場合である。各メッシュには、延焼速度を5m/分としたときの延焼時刻が示されており、このうち出火メッシュには1分が与えられている。

21	11	1	11	21	31	41	51	61	71
25	×	11	×	25	35	45	55	65	69
35	25	21	25	35	39	49	51	55	59
39	35	31	35	×	49	45	41	45	49
49	45	×	45	43	×	35	31	×	39
59	55	59	49	39	29	25	21	25	29
69	×	55	45	35	25	15	11	15	25
71	61	51	41	31	21	11	1	11	×
75	65	55	45	35	25	15	11	15	×
×	69	59	49	39	29	25	21	25	29

図2-2. 延焼動態図

次に、地区の“燃えやすさ”の指標となる平均延焼時間があるが、これは延焼対象となる木造メッシュの、燃えた時刻の平均値として求めており、図2-2の例では、90メッシュの平均として38.3分が得られた。

### 2-3 避難モデル

ここでの避難は、対象地区内の人々が、その地区に接する広域避難路や近隣公園などの、一次的な安全域に到達するまでの状態を扱っており、避難命令が出されると、各自そこに向かって最短な経路を通して移動するものとしている。従って、この間においては特に火災情報に基づいた誘導があるわけではなく、自由に避難が行われるものとしているが、一次的な安全域に到達した後、さらに広域的な避難が必要となる場合には、最終的な安全域となる広域避難地まで、誘導などにより安全に行ける状態を前提としている。

シミュレーションにはメッシュ表現を用いており、延焼モデルとの対応から、同じく50m角のメッシュを一単位とした。出火から避難完了までの避難時間は、移動を開始するまでの避難開始時間と、安全域までの移動に要する移動時間の2つに大別しており、このうち避難開始時間には、各メッシュとも同じ値を与えてこの避難モデルでの操作変数とした。これは、避難開始までの時間に決定的な影響を与えるのは、いつ避難命令が出されるかであり、それが全メッシュ同時に発令できると考えたからである。一方、移動については、安全域に至るまでの最も簡明な最短経路を、あらかじめデータとして各メッシュに与えており、その歩行速度には50m/分の一定値を考えたので、1分で1メッシュ移動できることになる。この例として、図2-2と同じ地域で、四周に向かう発散型の避難を行った場合の移動時間を図2-3に示す。各メッシュには外周に到達するまでの時間(単位、分)が与えられており、平均は2.20分となった。

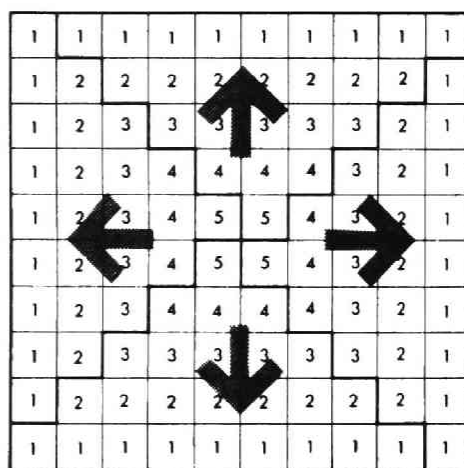


図2-3. 移動時間

以上のように、このモデルでは、対象地域が与えられるとその安全域との位置関係から、各メッシュの避難経路、従って移動時間は一意的に決まるようになっており、延焼状態を判断して経路を変えるなど、実際の避難においてとられる行動はモデルに組込まなかった。これは、

計画サイドからみた場合、パニック等が予想される災害時の避難においては、本能的で単純なルールに基づく行動しかあてにできないと考えたからで、そのような避難行動を前提として作成した防災計画の安全性に問題がある時には、延焼遮断のシステムの方にフィードバックして、一定水準の安全性を確保していこうと考えたからである。

## 2-4 評価モデル

防災計画の評価は、対象地区において火災が発生して避難が行われた時に、結果として何%の人の安全が確保できたかで表わすことができる。しかし、炎や煙により、実際に人々が死に至る状況を決定することは困難なので、ここではその前提となる、人と火災が同時に存在する状態が発生した場合に、「危険」と定義することにした。

すなわちこのモデルでは、延焼と避難の時系列変化の重ね合わせを行い、避難単位であるメッシュが、避難を開始する前に延焼してしまうか、あるいはその移動途中で延焼中のメッシュと重なることがあるかを調べ、このような状態に出会わず、無事に避難出来たメッシュ数の全体に対する比率でもって、地区の安全度の計測を行っている。

図2-4に、この重ね合わせを行った例を示す。これは図2-2の延焼状態に対して、出火5分後に避難を開始させ、図2-3に示した移動を行った場合の結果である。各メッシュには、延焼メッシュと重なった時刻(分)

が与えられており、1分は出火メッシュで、その他は移動途中でこの出火メッシュと重なった時刻である。この例では、全部で8個のメッシュが危険な状態に出会うことから、安全度は92%となる。

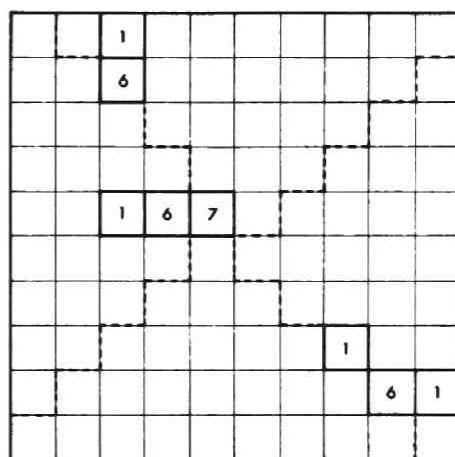


図2-4. 延焼と避難の重ね合わせ

## 3. シミュレーションによる解析

以上に述べてきたモデルを用いて、ここでは実際にシミュレーションを行い、第1章で求めた安全度評価の理論式(1.41)の検証や、このモデルで用いた各変数が、安全度に対してどの



様な影響を与えているかの感度解析を行ってみた。また、防火帯による地区分割の効果についても、同じくシミュレーションによる結果をもとにして、その考察を行っている。

なお、この研究での大きな特徴の一つである、出火地点の任意性をふまえた平均延焼時間、及び安全度を求めるため、ここでは同じ条件のもと、出火地点を全くランダムに与えるシミュレーションを各々10回繰返しており、その算術平均をもって一組の入力データの値とした。また、対象地区のモデルケースには、50m角のメッシュ100個(10×10)からなる正方形の領域を用いている。

### 3-1 安全度評価式の検証

ここでは(2.5)の理論式について、シミュレーションより求めた安全度と理論式から求めた安全度を比較することにより、評価関数としての妥当性を調べてみた。なおこの研究では、シミュレーションを、データを発生する計算機による実験(computer experiment)と考え、シミュレーションより直接得られる安全度を実験値Yとし、また平均延焼時間及び平均避難時間を(2.5)式に代入して求めた安全度を推定値Xと考え、YとXの相関係数を調べることで、理論式の検証を行っている。

$$\text{安全度} = \frac{\text{平均延焼時間}}{\text{平均延焼時間} + \text{平均避難時間}} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

できるだけ広い区間の安全度をサンプルにするため、各入力データには次のような区間の値を用いた。まず延焼速度には、2~20m/分まで2m/分間隔で10個の値を用い、出火件数には、1~10件までの10ケースを、また避難開始時間には、1, 5, 10, 15, 20分の5ケースを用いることにした。従って、全部で10×10×5=500個の組合せをシミュレートすることになる。なお、平均延焼時間を用いる理論式では、防火帯などにより燃えないメッシュが生じた時の安全度の上昇を、その平均時間の変化(増加)で表わすことはできない(平均延焼時間=+∞となるので)。従って、この検証のためのシミュレーションでは、不燃化率を操作変数から外しており、対象地区は木造メッシュのみで構成して、すべて延焼するようにした。次に、同じく理論式の検証において、安全域の配置が異なる場合のあてはまりの良さを比較するため、図2-5に示す3種類の避難タイプをとりあげており、その各々の場合について、上記の500個の安全度を求めてみた。なお、図2-5のAは発散型の避難タイプで、四周に、広域的な避難路としての安全域が存在する場合で、この時の平均移動時間 $T_S$ は2.2分となった。またBは集中型の避難タイプで、中央に100m×100mの一次的な安全域を設け、まずそこに全員が集結するものとした。

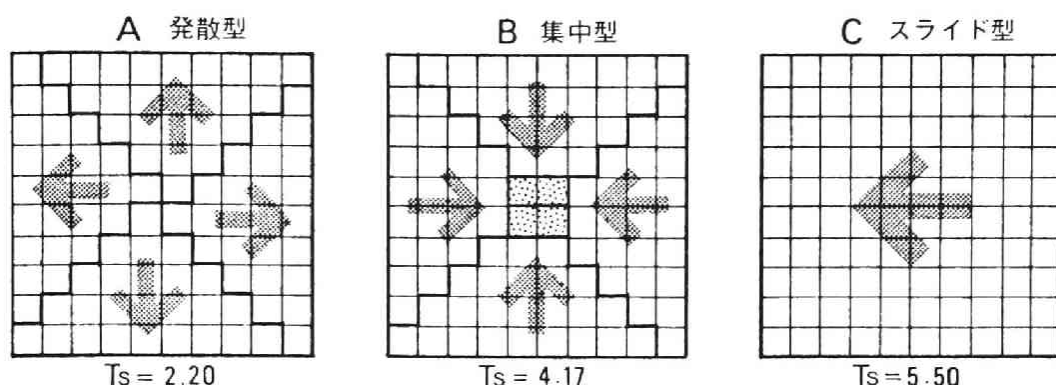


図2-5. 避難タイプ

従って、この時の対象領域は96メッシュとなり、 $T_S$ には4.17分が得られた。次にCはスライド型の避難タイプで、一辺のみに安全域が接しているとした場合であり、 $T_S$ は5.5分となった。

各避難タイプにおけるYとXの相関係数は、表2-4、図2-6のようになった。この相関係数は、XとYの平均的な関係からXに対するYの回帰直線  $Y' = aX + b$  を最小2乗法により求めた時、式(2.6)より得られるピアソンの相関係数  $r$  であり、YとXの間にみられる線型関係 ( $Y = aX + b$ ) の強さを示す値である。

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X}) \cdot (Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\text{但し、} \bar{X} = \frac{1}{N} \sum X, \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum Y$$

この場合それがいずれのタイプでも0.95以上の高い値となり、シミュレーション値と理論値の間には強い相関関係がみられ、また直線の形も図2-6に示すように、 $Y = X$  にかなり近いものであることがわかる。

表2-4. 相関係数

タイプ	回帰式 $Y = aX + b$		
	a	b	相関係数
A 発散型	1.561	-35.07	0.960
B 集中型	1.609	-46.67	0.955
C スライド型	1.465	-37.17	0.957

次に各避難タイプについて、シミュレーション値と理論値のあてはまりの良さを比較するため、ここでは(2.7)式の相関指数 $\rho$ を求める式を用いており、その $Y'$ に、直接理論値 $X$ を代入してみた。

$$\rho = \sqrt{1 - V_E/V} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\text{但し } V_E = \sum (Y - Y')^2, \quad V = \sum (Y - \bar{Y})^2$$

$Y$  : 実験値,  $Y'$  : 推定値 ( $X$  に対する  $Y$  の回帰値)

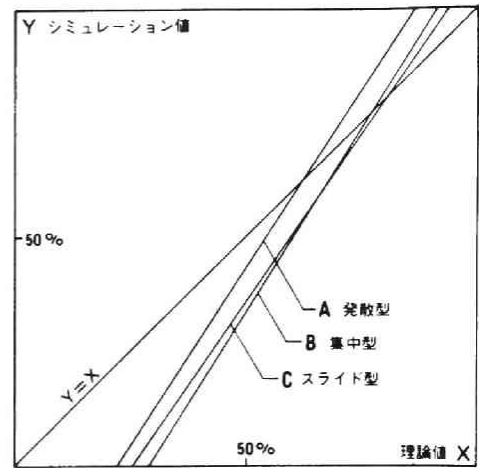


図 2-6. 相 関 図

すなわちここで求める $\rho$ は、シミュレーション値 $Y$ と理論値 $X$ が等しいはずであるとした場合に、その関係( $Y = X$ )に最も近いのはどのタイプかを求めるために算出した値であり、 $Y' = X$ とおいた $Y'$ が、 $X$ に対する $Y$ の回帰直線として実際に求められたわけではないので、いわゆる相関指数 $\rho$ とは意味を異にする。<sup>\*1</sup>

なお(2.7)式については、変数 $Y$ と $X$ の回帰関係が直線的で $Y$ が $Y' = aX + b$ で回帰されている場合には、 $\rho$ は(2.6)式の相関関数 $r$ と一致し、<sup>\*2</sup> 例えば表 2-4 の  $a, b$  を用いた  $Y' = aX + b$  を(2.7)式に代入すれば、表 2-4 の  $r$  と等しい $\rho$ が得られる。

\*1 すなわち $Y'$ が回帰により求められたものではないので、 $\bar{Y} = \bar{Y}'$ という関係が成立しておらず、 $V_E < V$  が必ずしも保証されない。従って、 $Y'$ と $Y$ の間にはかなりの差があるときには、 $1 - V_E/V$ が負になることもある。

\*2  $Y' = aX + b$ の $a, b$ は、(1)式で与えられる $V_E$ が最小になるように求められており、これは $V_E$ を $a$ および $b$ で偏微分して次のように算出される。

$$V_E = 1/N \cdot \sum (Y - Y') \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \partial V_E / \partial a &= 0 \\ \partial V_E / \partial b &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$a \cdot 1/N \cdot \sum X^2 + b \bar{X} = 1/N \cdot \sum XY \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{Y} = a \bar{X} + b \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$a = \sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) / \sum (X - \bar{X})^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで $Y - Y'$ は次式で表わされる。

$$Y - Y' = Y - (aX + b) = (Y - \bar{Y}) + a(X - \bar{X}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

従って、これと(5)の $a$ を(3)式に代入して、 $x = X - \bar{X}$ ,  $y = Y - \bar{Y}$ とおくと、 $V_E$ は次の様に変形される。

$$\begin{aligned} V_E &= \frac{1}{N} \cdot \sum (Y - Y')^2 \\ &= \frac{1}{N} \cdot \sum \left( y - \frac{\sum xy}{\sum x^2} \cdot x \right)^2 \\ &= \frac{1}{N} \cdot \left\{ \sum y^2 - 2 \cdot \frac{\sum xy}{\sum x^2} \cdot \sum xy + \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right)^2 \cdot \sum x^2 \right\} \end{aligned}$$

表 2-5. 適合度（相関指数）

避難タイプ	発 散 型	集 中 型	スライド型
相 関 指 数	0.893	0.782	0.790

この結果は表 2-5 のようになり、シミュレーション値と理論値がもっともよく適合するのは、タイプ A の発散型の避難である。これは、理論式における安全度の算出方法から考察すれば、次の様に説明されよう。

(2.5) の理論式において、ある 1 つのメッシュの安全は、そこが延焼してしまう時間と、そのメッシュから人がいなくなってしまう時間、すなわち避難開始時間との関係から求められており、移動途中において、他のメッシュの延焼状態により危険になることは直接含まれていない。そのかわり、移動に要する時間を求めてそれを避難開始時間の遅れに繰り入れており、結果的には避難開始時間の増加による安全度の減少で、移動途中の危険をもち込むことを試みている。従って、これは、どちらかといえば不確定な部分となるので、平均移動時間が小さく、その影響の少ないタイプ A の発散型の方が、あてはまりの良い結果になったといえよう。

### 3-2 各変数の感度解析

ここではシミュレーションより得られる値をもとにして、延焼速度や出火件数、及び不燃化率や避難タイプなどの各変数が、安全度に対してどのような影響を与えているかを調べてみた。解析には重回帰分析の方法を用いており、各変数の安全度に対する偏相関係数の絶対値から、その影響度を考察することにした。

まず、3-1 の検証に用いた、対象地域内に不燃造メッシュを含まない場合のデータをもと

$$= \frac{1}{N} \cdot \left\{ \sum y^2 - 2 \cdot \frac{(\sum xy)^2}{\sum x^2} + \frac{(\sum xy)^2}{\sum x^2} \right\}$$

$$= \frac{1}{N} \cdot \left\{ \sum y^2 - \frac{(\sum xy)^2}{\sum x^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに

$$V = \frac{1}{N} \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum y^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

であるから、(7)、(8) により、(2.7) 式の  $\rho$  は次の様に変形される。

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{V_E}{V}} = \sqrt{\frac{(\sum xy)^2}{\sum x^2 \cdot \sum y^2}} = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \cdot \sum y^2}}$$

$$= \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

これは(2.6)式の  $r$  と全く一致する。

にして、発散、集中、スライドの各避難タイプにつき、別個に解析を行ってみた。結果は表2-6、2-7、2-8のようになり、重相関係数はいずれも0.9前後の高い値となったので、この回帰式をもとに各変数の考察を行ってもさしつかえないといえよう。

表2-6. 発散型避難

	延焼速度	出火件数	避難開始時間	定 数	重相関係数
偏回帰係数	- 2.808	- 4.353	- 3.155	143.88	0.910
偏相関係数	- 0.766	- 0.679	- 0.846		サンプル数 500
単相関係数	- 0.496	- 0.384	- 0.659		

表2-7. 集中型避難

	延焼速度	出火件数	避難開始時間	定 数	重相関係数
偏回帰係数	- 2.879	- 4.494	- 2.931	127.83	0.898
偏相関係数	- 0.759	- 0.673	- 0.815		サンプル数 500
単相関係数	- 0.514	- 0.401	- 0.618		

表2-8. スライド型避難

	延焼速度	出火件数	避難開始時間	定 数	重相関係数
偏回帰係数	- 2.624	- 4.856	- 2.422	119.91	0.919
偏相関係数	- 0.800	- 0.777	- 0.824		サンプル数 500
単相関係数	- 0.526	- 0.487	- 0.574		

いずれの避難タイプにおいても、偏相関係数の大きさは、避難開始時間 > 延焼速度 > 出火件数、の順になり、特に避難開始時間がいつも0.8以上で、安全度に強い影響を与えている結果が得られた。

次に、不燃化率の影響を調べるため、それも変数に加えたシミュレーションを行ってみた。この場合には、延焼速度を2～10m/分まで、2m/分おきの5段階とし、出火件数も1～5件までの5段階におさえて、組合せの数を減らすようにした。また不燃化率については、0～40%までの10%おきで5段階の変化を行っており、各値に対応する数の不燃造メッシュを、対象地域に全くランダムに配置してシミュレーションを行うことにした。避難開始時間は、3-1の場合と同じ5段階としたが、これでも各避難タイプにつき、 $5^4 = 625$ 個のデータがサンプルとして得られることになる。この不燃化率も変数に加えた場合の重回帰分析の結果を、表2

－ 9, 2－10, 2－11 に示す。

表 2－9. 発散型避難

	延焼速度	出火件数	避難開始時間	不燃化率	定 数	重相関係数
偏回帰係数	－ 2.334	－ 4.509	－ 1.223	0.183	120.63	0.840
偏相関係数	－ 0.629	－ 0.616	－ 0.713	0.302		サンプル数 625
単相関係数	－ 0.439	－ 0.424	－ 0.552	0.172		

表 2－10. 集中型避難

	延焼速度	出火件数	避難開始時間	不燃化率	定 数	重相関係数
偏回帰係数	－ 3.161	－ 6.488	－ 1.530	0.229	123.13	0.866
偏相関係数	－ 0.677	－ 0.687	－ 0.731	0.317		サンプル数 625
単相関係数	－ 0.461	－ 0.473	－ 0.536	0.167		

表 2－11. スライド型避難

	延焼速度	出火件数	避難開始時間	不燃化率	定 数	重相関係数
偏回帰係数	－ 3.343	－ 7.286	－ 1.497	0.240	122.32	0.902
偏相関係数	－ 0.746	－ 0.773	－ 0.769	0.373		サンプル数 625
単相関係数	－ 0.484	－ 0.527	－ 0.520	0.174		

これによると、いずれのタイプでも不燃化率の偏相関係数は 0.3 程度となり、安全度に特に強い影響は与えていない。他の変数の影響度の違いは、表 2－9 の発散型では以前と同じく、避難開始時間 > 延焼速度 > 出火件数、の順となったが、表 2－10 の集中型では、避難開始時間 > 出火件数 > 延焼速度、また表 2－11 のスライド型では、出火件数 > 避難開始時間 > 延焼速度、などと、わずかの差ではあるが、避難タイプの違いにより安全度に対する影響度の順番が変わっている。

従って、次に避難形態の違いも考慮に入れた上での各変数の影響度を調べるため、3 タイプのデータ  $625 \times 3 = 1875$  個を同時に処理して解析を行ってみた。

まず、避難タイプの違いを平均移動時間の違いで表わし、重回帰モデルで処理した場合には、表 2－12 のような結果となった。なお各タイプの平均移動時間は、A の発散型で 2.20 分、B の集中型で 4.17 分、C のスライド型では 5.50 分となっている。

表 2-12. 重回帰モデル

	延焼速度	出火件数	避難開始時間	不燃化率	移動時間	定数	重相関係数
偏回帰係数	-2.946	-6.094	-1.417	0.217	-4.432	139.57	0.878
偏相関係数	-0.674	-0.686	-0.725	0.319	-0.549		サンプル数 1,875
単相関係数	-0.436	-0.451	-0.503	0.161	-0.314		

これによると、安全度に最も強い影響を与えているのはやはり避難開始時間で、次に出火件数と延焼速度がほぼ同じ値で続き、その後に移動時間、不燃化率がくるという順番になった。

次に避難タイプの違いを分類で表わして、同じデータを数量化Ⅰ類と重回帰の合成モデル<sup>\*1</sup>により分析してみた。これは避難タイプの違いによる影響度について、単に移動時間の大小では表わしきれない部分があるのではないかと、の疑問に対して行ったものである。結果は表 2-13 に示す通りで、避難タイプの偏相関は 0.556 となり、重回帰モデルのみで回帰した場合の偏相関 -0.549 と、絶対値ではほぼ同じ値となった。従って今回行った程度の避難形態の違いでは、その結果生ずる安全度への影響は、すべて平均移動時間の違いで表わしうることがわかる。なお、その他の変数間の関係は、表 2-12 の場合と全く変わらない。

表 2-13. 合成モデル

	延焼速度	出火件数	避難 開始時間	不燃化率	避難タイプ			重 相 関 係 数
					発 散	集 中	スライド	
偏回帰係数	－ 2.946	－ 6.094	－ 1.417	0.217	130.35	119.74	115.99	0.880
偏相関係数	－ 0.676	－ 0.688	－ 0.727	0.320	0.556			サンプル数 1,875
単相関係数	－ 0.436	－ 0.451	－ 0.503	0.161	0.318			

以上のことから結論をいうと、安全度に影響を与えている順番は、避難開始時間 > 出火件数 ≥ 延焼速度 > 移動時間 > 不燃化率となり、安全度向上に最も効果がある対策は、「できるだけ早く避難を開始すること」となる。従って、都市計画的な対策を行う場合でも、まず目標となる避難開始時間を設定し、その後、他の変数を順次操作して一定水準の安全度を確保するという方法が、妥当かつ最も効果的といえよう。

次に、3-1 の安全度評価式の検証で用いた、不燃造を含まない場合の発散型避難のデータ

\*1 合成モデルの詳しい説明は、第 2 部第 1 章「京都市における火災発生密度」を参照のこと。

500 個をもとにして、安全度  $Y$  の、平均延焼時間  $X_1$  と平均避難時間  $X_2$  による重回帰分析を行ってみた。これは  $Y$  を、 $X_1$  と  $X_2$  の線型重合である  $Y = a_1X_1 + a_2X_2 + C$  の形で回帰した場合に、どのような相関が得られるかを求めてみたものである。

結果は表 2-14 のようになり、重相関係数には  $R = 0.835$  が得られた。しかし 3-1 において、安全度を  $Y = a \cdot X_1 / (X_1 + X_2) + b$  の形で回帰した場合には、単純相関係数が  $r = 0.960$  にもなっており、従ってこれからも分数形で求められている評価式の妥当性が確かめられる。

表 2-14. 安全度の線型重合

	平均延焼時間	平均避難時間	定数	重相関係数
偏回帰係数	0.767	- 3.155	79.20	0.835
偏相関係数	0.681	- 0.767		サンプル数 500
単相関係数	0.513	- 0.659		

最後に参考までに、不燃化率も変数に含んだ場合の発散型避難におけるデータ 625 個をもとにして、平均延焼時間を基準変数にした重回帰分析も行ってみた。なおこの場合、対象地域に不燃造メッシュを含んでいるので、平均延焼時間は、“燃えた木造メッシュ”の平均値として算出している。

結果は表 2-15 のようになり、重相関係数は  $R = 0.753$  であまり良い回帰が行われたわけではないが、偏相関係数を比較すると、出火件数の影響が一番強いことがわかる。

表 2-15. 平均延焼時間の重回帰分析

	延焼速度	出火件数	不燃化率	定数	重相関係数
偏回帰係数	- 8.93	- 54.70	3.65	260.07	0.753
偏相関係数	- 0.288	- 0.677	0.523		サンプル数 625
単相関係数	- 0.197	- 0.605	0.403		

### 3-3 防火帯による地区分割の効果

木造家屋の連続する地域を防火帯により分割した場合には、地区の安全に対して次の様な効果が考えられる。まず、木造地区が道路、公園などの空地に変えられて防火帯が造成されると、



出火件数自体の減少が期待される。また、これが不燃建築群で構成された場合でも、そこでの出火が他の建物へ延焼することがないので、延焼火災件数の減少につながる。次に、地域が防火帯により分割されていると、1件の火災で延焼危険の生ずる範囲が、分割された一つの地区に限定されることになり、従って避難についても、延焼危険のある地区からさえ逃れておれば、一次的な安全は確保されることになる。

これらの効果を計測するため、ここでは次の2種のタイプについてのシミュレーションを行っており、初期状態とした、防火帯がなく木造メッシュのみが連続する場合との安全度の比較を行ってみた。

タイプⅠ：不燃造メッシュによる防火帯で、地域が分割されている場合

タイプⅡ：その分割を行うのに必要とした、同じ数の不燃造メッシュを全くランダムに配置した場合

ⅠとⅡの違いは、Ⅱの方は3-2で行ったのと同じく、単に不燃化率の安全度に対する影響を調べることになるが、Ⅰの場合は、同じ数の不燃造メッシュを規則的に並べ、防火帯としての役を成すようにした時の効果をみることになる。なお避難形態は、いずれも地域の外周に向かう発散型を基本としているが、防火帯には、そこも安全な避難路となる路線防火帯を考えたので、分割された地区ごと、同じく発散型の避難が行われるものとした。この例を図2-7に示す。

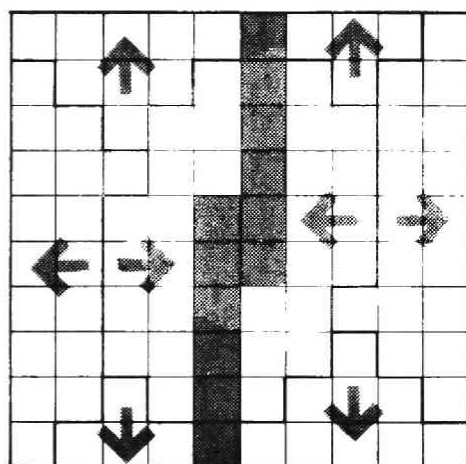


図2-7. 2分割における避難方向

地区の分割は、図2-8の上段に示す2~10

分割までの5ケースを行っており、これに対応する、タイプⅡのランダムに配置した場合を下段に示した。

シミュレーションは、この各分割ケースにつき、避難開始時間 $T$ を5段階( $T=1, 5, \dots, 20$ )に変化させて行っており、延焼速度を $5.6\text{m/分}$ 、出火件数を2及び3件とした場合の結果を表2-16、及び図2-9に示す。また同じ条件で、延焼速度を $8.2\text{m/分}$ とした場合を、表2-17、及び図2-10に示す。

グラフにおいて、実線はタイプⅠを、破線はタイプⅡの場合を示している。なお縦軸の安全度は、各10回のシミュレーションの平均値であり、横軸には不燃造メッシュ数をとったので、

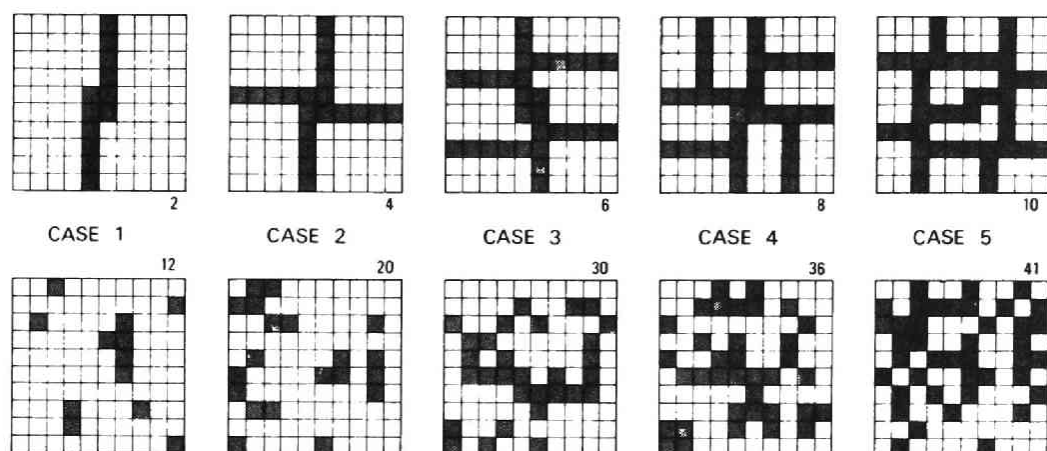


図 2-8. 分割ケース（上段：タイプⅠ，下段：タイプⅡ）

表 2-16. 安全度の変化（延焼速度 = 5.6 m/分）

出火件数 = 2

避難開始時間	ケース タイプ	1	2	3	4	5	初 期 状 態
1	Ⅰ Ⅱ	97.05 95.30	97.00 96.30	96.57 95.50	96.88 95.00	96.61 95.60	95.90
5	Ⅰ Ⅱ	97.05 95.30	97.00 96.30	96.57 95.50	96.88 95.00	96.61 95.60	95.90
10	Ⅰ Ⅱ	89.43 86.90	90.50 88.60	90.57 88.70	90.94 90.70	93.05 91.30	86.40
15	Ⅰ Ⅱ	85.80 83.80	87.25 85.30	86.86 86.30	87.19 88.60	91.19 88.40	82.90
20	Ⅰ Ⅱ	80.11 78.33	82.75 79.70	84.29 81.50	85.00 85.80	90.00 87.00	74.80

出火件数 = 3

避難開始時間	ケース タイプ	1	2	3	4	5	初 期 状 態
1	Ⅰ Ⅱ	95.00 93.40	95.38 93.90	95.43 92.50	95.31 93.00	94.92 93.20	92.90
5	Ⅰ Ⅱ	95.00 93.40	95.38 93.90	95.43 92.50	95.31 93.00	94.92 93.20	92.90
10	Ⅰ Ⅱ	84.89 81.20	85.88 85.80	87.29 85.50	87.81 88.20	88.31 88.00	80.95
15	Ⅰ Ⅱ	76.66 76.50	81.13 81.70	82.00 82.00	83.28 84.60	84.41 84.30	71.50
20	Ⅰ Ⅱ	72.16 67.90	74.13 75.40	77.57 77.40	80.31 81.50	82.37 81.30	64.02



表 2-17. 安全度の変化 (延焼速度 = 8.2 m/分)

出火件数 = 2

避難開始時間	ケース タイプ	1	2	3	4	5	初 期 状 態
1	I II	96.36 95.90	96.50 95.70	96.43 94.80	96.88 95.40	96.61 95.80	95.70
5	I II	96.36 94.60	96.50 94.30	96.43 93.60	96.88 94.30	96.61 94.70	93.40
10	I II	85.23 84.80	86.13 82.50	86.43 87.50	87.19 86.50	88.64 88.70	81.40
15	I II	77.84 79.20	79.75 74.50	83.29 83.00	84.69 81.30	86.61 85.20	71.80
20	I II	62.61 66.60	67.13 60.90	77.29 76.00	80.78 74.10	84.75 77.80	55.20

出火件数 = 3

避難開始時間	ケース タイプ	1	2	3	4	5	初 期 状 態
1	I II	95.34 94.10	95.38 93.80	95.29 93.50	95.31 93.10	94.92 93.90	93.10
5	I II	95.11 91.60	95.38 91.70	95.29 92.00	95.31 91.80	94.92 92.80	90.00
10	I II	80.57 77.90	81.75 80.40	81.71 79.80	85.47 82.50	85.59 84.80	73.40
15	I II	72.84 67.00	75.75 73.50	77.71 72.30	83.13 75.70	84.24 80.40	64.00
20	I II	57.84 50.66	63.50 62.00	68.43 60.20	79.84 65.90	82.71 70.80	47.10

タイプ I の値は、その分割に対応するメッシュ数でプロットしている。また延焼速度の 5.6 及び 8.2 m/分は、浜田式の風下側延焼速度 (2.4) において、家屋長 8 m、隣棟間隔 2 m の場合に、風速をそれぞれ 15 m/sec 及び 20 m/sec としたときの値である。

これによると、避難開始時間が早い時には、不燃造メッシュの存在自体があまり影響を与えていない。しかし避難開始が遅くなればなる程、また延焼速度が早くなる程、不燃化による安全度の上昇は高くなり、分割の効果もこの時に現われてきている。例えば、図 2-10、出火件数 = 3、T = 20 においては、分割が増すとタイプ I、II 間では安全度に 10 % 程度の差を生じ、初期状態からは 30 % も上昇する結果になった。従って、地区分割の効果が顕著に現われるのは、延焼速度が早く、かつなかなか避難できなかったような時で、ほぼ延焼状態のみにより安全度が決定されてしまう場合といえよう。しかし出火件数が多くなると、ランダムに配置した

場合とあまり大差がないことになり、この例として、延焼速度＝8.2 m/分、出火件数＝5、としたときの結果を、表2-18、図2-11に示しておく。

表2-18. 安全度の変化（延焼速度＝8.2 m/分）

出火件数＝5

避難開始時間	ケース タイプ	1	2	3	4	5	初 期 状 態
1	I II	92.05 88.20	92.38 88.70	92.00 89.00	92.19 89.30	91.53 89.20	88.70
5	I II	91.50 83.00	92.38 85.10	92.00 87.20	92.19 87.00	91.53 87.30	83.70
10	I II	65.80 61.20	68.25 66.00	69.14 70.80	70.47 73.10	76.27 75.60	56.50
15	I II	54.43 48.30	58.13 54.90	62.57 61.30	65.31 65.10	73.22 69.50	42.20
20	I II	32.95 32.50	40.50 39.40	48.71 47.70	58.13 53.00	70.17 59.80	21.90

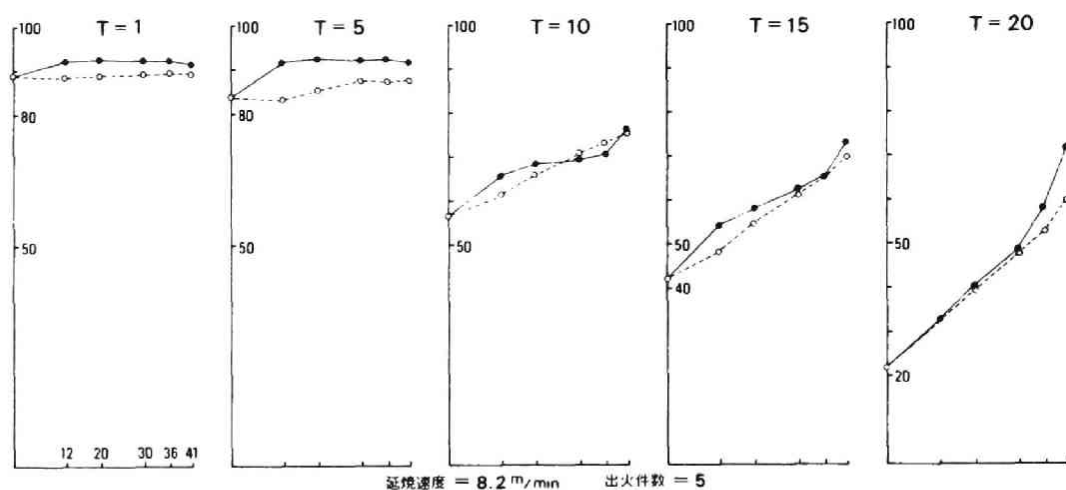


図2-11. 安全度の変化（実線：タイプⅠ，破線：タイプⅡ）

#### 4. まとめ

この研究は、地震火災に対しての、都市の防災システムのシミュレーションを試みたものであるが、一般に火災を扱った場合には、その出火地点の予測がきわめて難しい問題となる。従ってここでは、①出火地点の任意性、及び②緊急時に人間がとりうる単純な行動に基づく避

難計画、の2つを所与の条件とし、これらの前提をふまえた上での防災計画を考えるため、延焼と避難を独立に扱っており、両者の重ね合わせから安全性を論じていることがモデルの特徴となっている。

(2.1)の安全度評価式については、ここでのシミュレーションから得られる値においては、その妥当性を十分に確かめられたと考える。しかしこの式は、もとより厳密な値を求めるためのものではなく、概算値として得られる安全度から地区ごとのランク付けを行い、防災対策の優先順位を決める場合に有効な方法となろう。

次に感度解析からは、安全度を左右している主要因が、避難開始時間  $>$  出火件数  $\geq$  延焼速度の3つであり、「避難開始時間の決定」が、防災対策のポイントになることがわかった。また、不燃化促進による効果が大きく現われるのは、延焼速度が早く、かつ避難開始が遅くなった場合であり、この時さらに、防火帯を構成するようにして地域を分割しておくこと、より大きな安全度を得られることが確かめられた。なお、分割された一地区の安全度は、それを一つの領域として(2.1)の評価式を適用することにより、同様に算出できるが、その際、分割が等しい面積で行われていると、一地区の安全度がすなわち全体の安全度となり、この逆もまた成り立つ。

#### 参 考 文 献

- 1) 「東京都の大震火災被害の検討」 東京消防庁火災予防対策委員会報告 東京消防庁 昭和36年7月
- 2) 「東京都の大震火災被害の検討(抜すい) 第2報」 東京消防庁 昭和42年3月
- 3) 水野弘之、堀内三郎「地震時の出火率と住家全壊率の関係について」 日本建築学会論文報告集 第247号 昭和51年9月
- 4) 堀内三郎「都市の消防施設に関する研究」 京都大学学位論文 昭和36年3月
- 5) 浜田稔「火災の延焼速度について」 火災の研究 相模書房 昭和26年10月
- 6) 「大火」 調査資料(昭和21~27年) 災害科学研究会 1954 技報堂

## 第3章 安全度評価方法の定式化

### — 組合せ理論による安全度の算出 —

#### 1. 概 説

第1章においては、対象とする地区の平均延焼時間と平均避難時間を用いて、火災の延焼に対する人々の安全度が次の(3.1)式で表わせることを理論的に証明した。

$$\text{安全度} = \frac{\text{平均延焼時間}}{\text{平均延焼時間} + \text{平均避難時間}} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

また第2章では、シミュレーションより求めた安全度とこの(3.1)式を用いて求めた安全度との相関を示すことにより、その評価式としての妥当性を証明した。なおその際(3.1)式の平均延焼時間に代入した値は、安全度を求めるシミュレーションにおいて、同時に算出される、シミュレーション値としての平均延焼時間である。

一方この章では、対象とする地域内の各点について、任意のnヶ所の出火点からの最短距離(平均延焼距離)を確率的に求める方法を示しており、それをもとにして、地区の平均延焼時間の算出を試みている。また、防火帯により地区を分割した場合の効果についても、同じく組合せ理論に基づいた定式化を行っており、最後に、これらの方法を用いて安全度を試算した例を示している。

#### 2. 平均延焼時間の算出

ここでは、対象とする地域においてn件の出火が予想される場合に、その出火地点が全く任意である(どこで発生するかわからない)ことを前提にして、以下の問題を扱う。

ある地点が出火後何分ぐらいで延焼するかは、そこから一番近い出火点までの距離(延焼距離)と、その時の延焼速度により求めることができる。従って、ここではまず対象地区内の各地点が、任意のn個の出火点に対して持つ距離の中で最も近い出火点との距離がどのくらいの値になるのか、その期待値を求めており、さらにそれらを全地点で平均した値により、地区としての平均延焼距離を算出している。なお対象とする地区の形状は、その領域に属する任意の2点間の延焼距離が直線で表わされることが必要なので、図3-1, aに示す凸なるものとする。

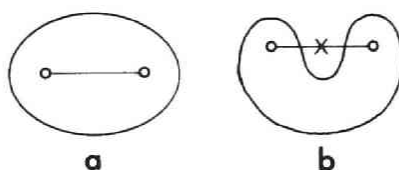


図 3-1.

## 2-1 平均延焼距離

今、対象地域を  $k$  個のメッシュに分割し、その中の一つのメッシュ  $i$  に与えられる延焼距離について考える。

1 件の火災に対する出火点には、 $k$  個のメッシュのうちのどれか一つが選ばれることになるが、出火地点の任意性からその選択される確率は各メッシュとも等しく、すべて  $1/k$  となる。故に、メッシュ  $i$  が 1 件の出火に対して持つ延焼距離には、メッシュ  $i$  と  $k$  個のメッシュの中心点を結んでできる  $k$  本の距離  $\ell_j^i$ ,  $j=1 \sim k$ , のうち、どれか 1 本が  $1/k$  の確率で与えられることになる。従って  $n$  件の出火に対して地点  $i$  が最終的に持つ延焼距離には、この  $k$  本の距離  $\ell_j^i$ ,  $j=1 \sim k$ , の中から、繰返しを許して  $n$  本を選んだ中で一番小さな値が与えられることになる。

ここで、この距離  $\ell_j^i$  を小さいものから順に並びかえ、 $1 \sim k$  までの番号をつけて新たに  $L_j^i$ ,  $j=1 \sim k$ , とする。その上で、各  $L_j^i$  が、地点  $i$  の最終的な延焼距離として選ばれる確率を考えると、それは次の様にして求められる。

ある一つの値  $L_m^i$ , ( $1 \leq m \leq k$ ) が延焼距離となるためには、 $n$  本選んだ距離の中に、 $L_m^i$  が少なくとも 1 回以上現われているとともに、その他の距離に、 $L_m^i$  より小さなものが入っていないことが必要である。

今、 $n$  本の中に  $L_m^i$  が  $s$  回出現するとした場合、その組合せは  ${}_nC_s$  となる。また、 $L_m^i$  の生起確率は  $1/k$  であるが、残りの  $n-s$  本の距離には、 $L_m^i$  より大きな値のものしか含むことができなく、その様な状態の生起確率は、 $(k-m)/k$  となる。以上により、 $L_m^i$  が  $n$  本のうち  $s$  回発生する確率  $p(n, s)$  は、次の (3.2) 式で表わされることになる。

$$p(n, s) = {}_nC_s \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^s \cdot \left(\frac{k-m}{k}\right)^{n-s} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 $s$  には  $s=1 \sim n$  までの各場合が考えられるので、結局、 $m$  番目に小さい距離  $L_m^i$  が延焼距離となる確率は、次の  $P_m(n)$  で表わされる。



$$\begin{aligned}
 P_m(n) &= \sum_{s=1}^n p(n, s) \\
 &= \sum_{s=1}^n {}_nC_s \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^s \cdot \left(\frac{k-m}{k}\right)^{n-s} \quad \dots\dots\dots (3.3)
 \end{aligned}$$

従って、任意の  $n$  個の出火点に対する地点  $i$  の延焼距離の期待値  $L^i(n)$  は、 $i$  と他の点  $m$  を結んだ距離  $L_m^i$  に、上記の生起確率  $P_m(n)$  を乗じたものを、 $m=1 \sim k$  について加算して次の(3.4)式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 L^i(n) &= \sum_{m=1}^k L_m^i \cdot P_m(n) \\
 &= \sum_{m=1}^k L_m^i \cdot \left[ \sum_{s=1}^n {}_nC_s \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^s \cdot \left(\frac{k-m}{k}\right)^{n-s} \right] \quad \dots\dots\dots (3.4)
 \end{aligned}$$

この  $L^i(n)$  を、 $i=1 \sim k$  の各点について求めて平均すれば、対象地区に  $n$  件の出火があった場合の平均延焼距離  $L(n)$  を求めることができる。

$$\begin{aligned}
 L(n) &= \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k L^i(n) \\
 &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{m=1}^k L_m^i \cdot \left[ \sum_{s=1}^n {}_nC_s \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^s \cdot \left(\frac{k-m}{k}\right)^{n-s} \right] \dots (3.5)
 \end{aligned}$$

## 2-2 分割メッシュの違いによる延焼距離の変動

(3.5)式で求められる平均延焼距離  $L(n)$  を、延焼速度で割れば、対象地区の平均延焼時間が算出される。しかし(3.5)式には、メッシュの個数  $k$  が変数として入っているので、次に、同一の対象域において、メッシュ数が異なる場合、すなわち単位とするメッシュの大きさが異なる場合に、延焼距離がどの程度変化するかを調べてみた。

計算対象には、100 m 角の正方形の領域を用いて、表 3-1 に示す 4 種類のメッシュ分割を行ってみた。各分割ケースについて、1～10 件までの出火に対する平均延焼距離を求めてみたところ、結果は表 3-2 のようになった。

表 3-1. 分割ケース

ケース	1	2	3	4
分割数	5×5	8×8	10×10	12×12
1メッシュの辺長(m)	20.0	12.5	10.0	8.33

表 3-2. 平均延焼距離 (100 m 角)

分 割 出火 件数	1	2	3	4
1	50.95	51.71	51.87	51.93
2	38.20	38.61	38.72	38.77
3	31.13	31.81	31.95	32.01
4	26.75	27.54	27.70	27.76
5	23.66	24.54	24.71	24.78
6	21.32	22.29	22.47	22.54
7	19.47	20.52	20.71	20.79
8	17.95	19.08	19.29	19.38
9	16.67	17.89	18.10	18.20
10	15.58	16.87	17.10	17.20

これによると、この程度の分割の違いではたいした差は現われていないが、メッシュ間の距離を各メッシュの中心点を結んで求めていることから、分割が荒くなるほど領域を小さくした結果になり(図 3-2)、その影響で平均延焼距離も小さくなっている。しかしこれは、延焼時間が短くなって地区の安全度を実際より低く見積ることになるので、防災的には安全側の問題として扱えよう。

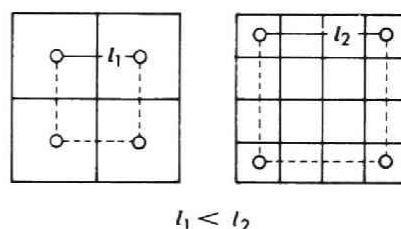


図 3-2.

なお一般に、どの程度の大きさのメッシュに分割するかは、メッシュを用いて表わす値に、どのくらいの精度が要求されるかにより判断されるもので、単に分割を細くすればよいというものではない。

表 3-2 のうち、10×10 分割のときの、出火件数  $n$  に対する平均延焼距離  $L(n)$  の変化をグラフで示すと、図 3-3 のようになる。またこの値をもとに、延焼速度  $V$  を、2～10 m/分 まで変化させたときの平均延焼時間  $T(n, V)$  を、表 3-3 に示す。

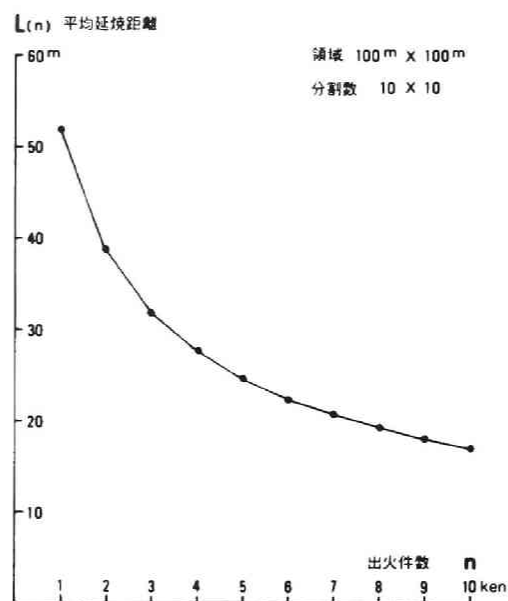


図 3-3. 平均延焼距離 (10×10 分割)

表 3-3. 平均延焼時間 (100 m 角)  $T(n, V)$   $n$ : 出火件数,  $V$ : 延焼速度 (m/分)  
 $L(n)$ : 平均延焼距離 (m)

$\begin{matrix} V \\ n \end{matrix}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	$L(n)$
1	25.94	12.97	8.65	6.48	5.19	4.32	3.71	3.24	2.88	2.59	51.87
2	19.36	9.68	6.45	4.84	3.87	3.23	2.77	2.42	2.15	1.94	38.72
3	15.98	7.99	5.33	3.99	3.20	2.66	2.28	2.00	1.78	1.60	31.95
4	13.85	6.93	4.62	3.46	2.77	2.31	1.98	1.73	1.54	1.39	27.70
5	12.36	6.18	4.12	3.09	2.47	2.06	1.77	1.54	1.37	1.24	24.71
6	11.24	5.62	3.75	2.81	2.25	1.87	1.61	1.40	1.25	1.12	22.47
7	10.36	5.18	3.45	2.59	2.07	1.73	1.48	1.29	1.15	1.04	20.71
8	9.65	4.82	3.22	2.41	1.93	1.61	1.38	1.21	1.07	0.96	19.29
9	9.05	4.53	3.02	2.26	1.81	1.51	1.29	1.13	1.01	0.91	18.10
10	8.55	4.28	2.85	2.14	1.71	1.43	1.22	1.07	0.95	0.86	17.10

### 2-3 シミュレーションによる平均延焼時間との比較

第 2 章では、50 m 角のメッシュ 100 個 (10×10) からなる地区の平均延焼時間を、シミュレーションにより求めてみた。従ってここでも同じく、500 m 角の地区を 100 個のメッシュに分

割した場合の平均延焼時間を算定することにして、それと第2章のシミュレーション値との比較を行ってみた。

出火件数に1～10件までの値を考えると、各件数に対する平均延焼時間は、先に100<sup>m</sup>角の地区を10×10に分割して求めた表3-3の値を5倍したものになり、それとシミュレーションより求めた値とを並記したものを、表3-4、及び図3-4に示す。なおシミュレーション値は、各出火件数につき、その出火地点をランダムに決定して行ったシミュレーション、10回の平均値である。

表3-4. 平均延焼時間 (分)

上段(理論値 L/V)

下段(シミュレーション値, 10回の平均)

延焼 速度 出火 件数	V m/min										L 平均距離 (m)
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
1	129.7	64.8	43.2	32.4	25.9	21.6	18.5	16.2	14.4	13.0	259.3
	140.8	74.2	45.1	35.0	29.0	24.2	22.4	16.6	17.0	17.4	
2	96.8	48.4	32.3	24.2	19.4	16.1	13.8	12.1	10.8	9.7	193.6
	102.0	51.8	35.7	28.8	21.6	17.7	15.9	13.3	14.1	13.1	
3	79.9	40.0	26.6	20.0	16.0	13.3	11.4	10.0	8.9	8.0	159.8
	82.4	43.8	30.4	21.7	16.2	14.5	13.5	11.4	10.8	9.90	
4	69.3	34.6	23.1	17.3	13.9	11.5	9.89	8.66	7.69	6.93	138.5
	78.3	39.3	24.5	18.1	16.1	13.8	12.2	9.35	9.13	9.87	
5	61.8	30.9	20.6	15.4	12.4	10.3	8.82	7.72	6.86	6.18	123.5
	63.9	33.6	21.9	17.7	14.0	11.4	10.6	8.44	8.92	8.64	
6	56.2	28.1	18.7	14.0	11.2	9.36	8.02	7.02	6.24	5.62	112.3
	55.6	29.0	19.1	14.9	12.7	10.0	9.23	7.43	7.58	7.83	
7	51.8	25.9	17.3	13.0	10.4	8.63	7.40	6.48	5.76	5.18	103.6
	52.0	27.4	18.2	13.5	11.2	9.42	8.77	7.10	6.95	6.98	
8	48.2	24.1	16.1	12.1	9.64	8.04	6.89	6.03	5.36	4.82	96.43
	47.6	25.2	16.7	12.9	10.6	8.68	8.11	6.61	6.67	6.67	
9	45.3	22.6	15.1	11.3	9.05	7.54	6.47	5.66	5.03	4.53	90.52
	46.0	24.5	14.8	12.5	9.98	8.41	7.91	5.91	6.45	6.27	
10	42.8	21.4	14.3	10.7	8.55	7.13	6.11	5.34	4.75	4.28	85.50
	41.0	23.5	15.0	11.8	9.25	7.58	7.63	6.01	6.14	5.85	

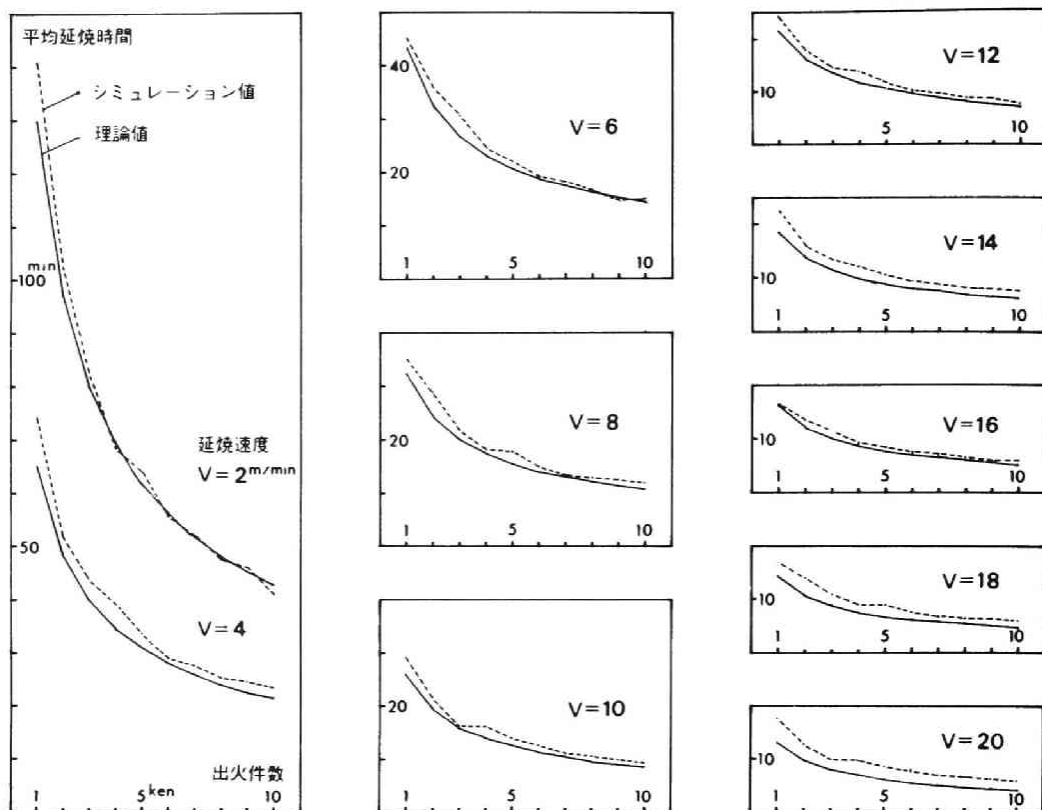


図3-4. 平均延焼時間の比較

この図3-4からも両者の値がほぼ一致していることはわかるが、さらに、シミュレーション値をY、ここで求めた理論値をXとして、表3-4で示した100組の値をもとに、YとXの相関係数を求めてみた。

結果は図3-5のようになり、回帰直線は $Y = 1.05X + 0.914$ で、相関係数には $r = 0.998$ もの高い値が得られた。従って、両者の間には全く差がないことから、木造家屋のみが連続した地域の平均延焼時間を求める場合には、シミュレーションの代りにここで述べた解析的な方法を用いても、何ら問題がないといえよう。

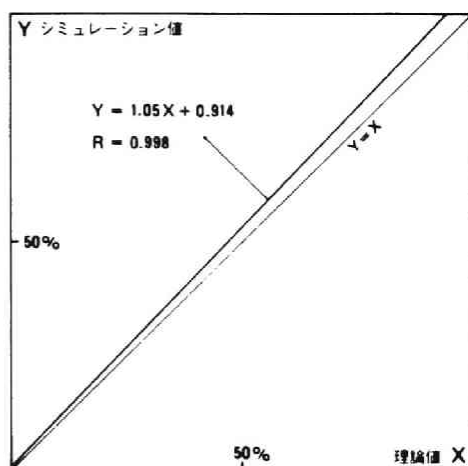


図3-5. シミュレーション値との相関  
(平均延焼時間)

### 3. 安全度の算出

(3.1)式を用いて安全度を算出する場合に必要な、平均延焼時間は、以上に述べた方法により求めることができる。一方、同時に必要となる避難時間は、第2章の2.「避難モデル」の項において、既に決定論的な扱いをしているので、ここでもその算出方法をそのまま用いることにしており、その概略を以下に説明する。

#### 3-1 避難時間の扱い方

避難時間は、出火時から避難完了までの時間であり、地区の避難のしやすさを表わすものである。ここでは、それを避難開始までの時間と移動時間の2つに大別しており、前者には計画変数としての扱いから、全地域同一の値を与えた。一方、移動についても、安全域への最も簡明な最短経路をあらかじめ決定しており、また移動速度も50<sup>m</sup>/分の一定値としたので、対象域が決まると地区の移動時間は一意的に求まることになる。

ここでは、平均延焼距離を求める際に行ったのと同じメッシュ分割を用いて、まず各地点の移動時間を求め、それらの平均値で地区の移動時間を表わすことにした。例えば、100<sup>m</sup>角の地域を10×10のメッシュに分割して、発散型の避難を行った場合には、平均移動時間は0.44分となり、500<sup>m</sup>角のときには、これを5倍して2.20分が得られることになる。

なお移動については、その速度が50<sup>m</sup>/分と、火災の延焼速度が5<sup>m</sup>/分程度なのに対して、オーダが異なるほどの違いがあり、対象領域が小さい場合には、避難開始時間に比べてもごく小さな値となる。従って、移動時間が安全度に影響を及ぼすのは、非常に条件が悪い時であり、これからも、「いつ避難を開始するか」という避難開始時間が、安全度に対しての決定的要因になっていることがわかる。

#### 3-2 シミュレーションによる安全度との比較

第2章では、(3.1)式に代入する平均延焼時間に、シミュレーションより求めた値を用いて、その安全度評価式としての検証を行ってみた。ここでは、その平均延焼時間に、前節で示した方法による値を代入して理論的な安全度を求め、同じくシミュレーションによる安全度との比較を行ってみた。

シミュレーション値としての安全度には、対象地域に不燃造メッシュを含まず、発散型の避難を行わせて、延焼速度、出火件数、及び避難開始時間を変化させた場合の500個のデータを用いており、それに対応する理論的な安全度を求めて相関を調べてみた。

シミュレーション値との間には、すでに平均延焼時間で高い相関が確かめられていることから予想はできるが、第2章で行った場合とほぼ同様な結果となり、シミュレーション値をY、理論値をXとした回帰直線には、 $Y = 1.469X - 25.65$  が得られ、単純相関係数は  $r = 0.949$  となった(図3-6)。また、 $Y = X$ としての適合度は、相関指数が  $\rho = 0.900$  となって、第2章の場合よりわずかながら良い結果が得られた。

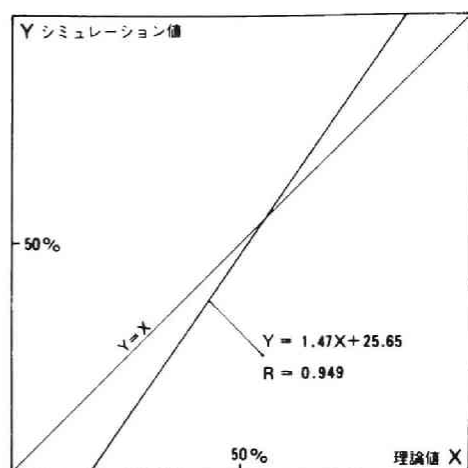


図3-6. シミュレーション値との相関  
(安全度)

#### 4. 地区分割の効果に対する確率的考察

防火帯による地区分割の効果は、解析にシミュレーションモデルを用いた場合の結果を第2章において示した。ここでは、同じ問題を延焼危険と出火件数の減少としてとらえ、確率論的な立場から、その効果予測の定式化を試みてみた。

##### 4-1 延焼危険の算定

ある地域が防火帯により分割されていると、分割された地区相互間では延焼が生じないことから、地域全体の安全度が向上することになる。ここではその効果を延焼危険の減少としてとらえ、地区の分割数と出火件数の2つを変数にして、その定式化を行ってみた。

この基本的な考えを述べると、次の様になる。

図3-7, aを、木造家屋の連続する地域とした時、そこに1件の出火が予想される場合には、延焼危険は100%となる。しかしこれを図3-7, bのように、防火帯により2つの地区A, Bに等分割すると、1件の火災により延焼するのはA, Bのいずれか一方となることから、地区全体の延焼危険は50%に減少する。

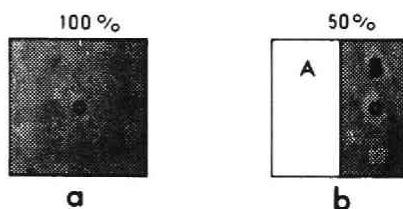


図3-7. 延焼危険の減少

同様に、あらかじめ2分割されている地域に、2件の出火が予想される場合の問題について考える。ここでは、火災の発生は前回の出火場所には影響されず、1件ごと独立な事象と

考えているので、その発生状態には、表3-5に示す4つのケースが考えられる。また、各火災のA、B両地区での出火確率は、毎回同じで $1/2$ となることから、4状態の生起確率 $P_i$ はいずれも $P_i = (1/2)^2 = 1/4$ となる。従って、この $P_i$ に、対応する各状態の延焼危険度 $D_i$ を乗じて加算すれば、地域の延焼危険の期待値 $E$ が求められる。この結果は表3-5のようになり、地区の延焼危険度には $E = 75\%$ が得られる。

表3-5. 2分割, 2出火の延焼危険

ケース	出火地区		延焼地区	延焼危険 $D_i$	生起確率 $P_i$	$D_i \times P_i$	期待値 $E$
	1nd	2nd					
1	A	A	A	50	$1/4$	12.5	$\Sigma D \cdot P$ 75.0 %
2		B	A, B	100	$1/4$	25.0	
3	B	A	A, B	100	$1/4$	25.0	
4		B	B	50	$1/4$	12.5	

以上のことは、一般的には次の様な問題として扱える。

「木造家屋が密集した地域において、出火地点が全く任意な $n$ 件の火災が、同時に発生することが予想されるとき、そこを防火帯により、他への延焼がない $k$ 個の等面積のゾーンに分割した場合に、地域全体の延焼危険がどの程度になるかを予測すること。但し、延焼危険の算定は、1つのゾーンに少なくとも1件以上の出火が予想されると、その区画の中はすべて延焼対象になると考えて、全地域の $1/k$ に延焼危険があるものとする。」

この解は、順列、組合せの問題として次のように求められる。

1件の火災は、その発生場所に $k$ 個のゾーンのうちどれか一つをとることから、 $n$ 件の出火による発生状況（順列の数）には、全部で $k^n$ 個の状態が考えられる。このうち、 $n$ 件の火災が、 $J$ 個の異なるゾーンにわたって発生する場合の状態の数を $P_k^J(n)$ とすると、それは次の(3.6)の漸化式で与えられる。

$$P_k^J(n) = {}_k C_J \cdot \left[ J^n - \sum_{i=1}^{J-1} P_k^i(n) \right] \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\text{但し, } P_k^1(n) = {}_k C_1 \cdot 1 = k \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

従って、その状態の生起確率は $P_k^J(n)/k^n$ となり、この場合には、地域全体の $J/k$ が延焼危険になる。

以上のことから、対象地域の延焼危険の期待値 $P(k, n)$ は、 $n$ 件の火災が、一つのゾーンか



ら高々  $n$  個 ( $J = 1 \sim n$ , 但し  $n \geq k$  のときは  $J = 1 \sim k$ ) のゾーンにわたって発生する場合の、延焼危険と生起確率の積を加算したものとして、次の (3.8) 式で与えられることになる。

$$P(k, n) = \sum_{J=1}^n J/k \cdot P_k^J(n)/k^n$$

$$= \sum_{J=1}^n J/k^{n+1} \cdot {}_k C_J \cdot [J^n - \sum_{i=1}^n P_i^J(n)] \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

この (3.8) 式において、地区の分割数を  $k = 1 \sim 10$  まで、出火件数を  $n = 1 \sim 10$  まで変化させて求めた延焼危険を、表 3-6 に示す。

表 3-6. 延焼危険度  $P(k, n)$  (単位, %)

出火件数 $n$ $k$ 分割数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2	50.0	75.0	87.5	93.8	96.9	98.4	99.2	99.6	99.8	99.9
3	33.3	55.6	70.4	80.3	86.8	91.2	94.2	96.1	97.4	98.3
4	25.0	43.8	57.8	68.4	76.3	82.2	86.7	90.0	92.5	94.4
5	20.0	36.0	48.8	59.0	67.2	73.8	79.0	83.2	86.6	89.3
6	16.8	30.6	42.1	51.8	59.8	66.5	72.1	76.7	80.6	83.9
7	14.3	26.5	37.0	46.0	53.7	60.3	66.0	70.9	75.0	78.6
8	12.5	23.4	33.0	41.4	48.7	55.1	60.7	65.6	69.9	73.7
9	11.1	21.0	29.8	37.6	44.5	50.7	56.2	61.0	65.4	69.2
10	10.0	19.0	27.1	34.4	41.0	46.9	52.2	57.0	61.3	65.1

次に、シミュレーションモデルを用いて行った第 2 章の 3-3, 「防火帯による地区分割の効果」との関係は、この延焼危険度  $P(k, n)$  から求められる安全度  $S(k, n)$ ,  $S(k, n) = 1 - P(k, n)$  が、3-3 で求めた安全度の極限值として扱える。すなわち  $S(k, n)$  は、延焼状態のみから地域の安全が決定される場合の値で、避難を行わなかった時とか、延焼が早くて避難する余裕がないような状態の安全度と考えることがで

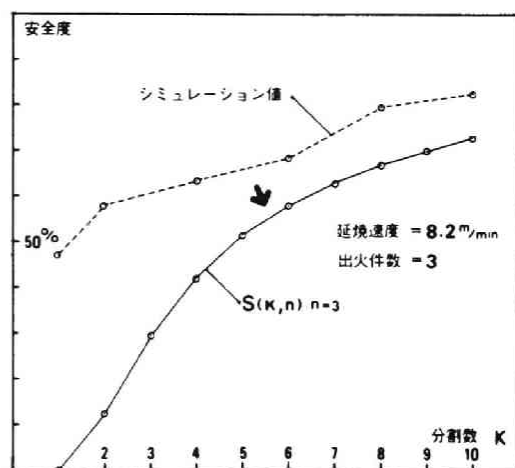


図 3-8. 極限值としての安全度

きる。この対応を見るため、第2章3-3で行ったシミュレーションの中で、延焼速度が8.2 m/分の場合に、出火件数が  $n=3$  で、避難開始時間を20分として求めた安全度と、この  $S(k, n)$  を並記したものを図3-8に示す。なお、図中3-3のシミュレーション値は破線で示してある。

#### 4-2 出火件数の減少予測

ある地域に、出火地点が全く任意な  $n$  件の火災が予想されるとき、そこを防火帯により、 $k$  個の等面積のゾーンに分割しておく、当然のこととして、一つのゾーンで予想される出火件数の減少が期待される。ここでは、その値がどの程度になるかを、確率的に求めてみた。

以前と同じく、1件の火災が一つのゾーンに発生する確率は  $1/k$  となるので、 $n$  件のうち、 $r$  件がそこに発生する確率  $P_k(n, r)$  は、組合せの問題として次の(3.9)式で求められる。

$$P_k(n, r) = {}_nC_r \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^r \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{n-r} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

$k$  : ゾーン分割数

$n$  : 地域出火件数

$r$  : ゾーン出火件数 ( $0 \leq r \leq n$ )

ここで、一つのゾーンに、 $n$  件の火災のうち1件も発生しない場合の確率  $P_k(n, 0)$  をとってみると、それは、(3.8)式で示した延焼危険度  $P(k, n)$ 、及び4-1で示した安全度  $S(k, n)$  と、次のような関係になる。

$$\begin{aligned} P_k(n, 0) &= 1 - P(k, n) \\ &= S(k, n) \quad \dots\dots\dots (3.10) \end{aligned}$$

すなわち、 $P_k(n, 0)$  は  $P(k, n)$  の排反事象であり、延焼危険に対する安全度  $S(k, n)$  は、 $k$  個に分割された中の一つのゾーンに、1件も火災が起こらない確率からも求めることができる。これは1個のゾーンの安全度である  $P_k(n, 0)$  が、地域全体の安全度  $S(k, n)$  を表わしていることになり、この地区分割を、システム分割の問題としてみれば、「一つのシステム(地域)の安全を、 $k$  個の相互に独立なサブシステム(ゾーン)の安全の問題に分割しており、しかも1個のサブシステム(ゾーン)の安全度の向上が、システム全体(地域)の安全度の向上と等価な関係になっている」ということができよう。

なおこの  $P_k(n, r)$  については、 $k, n, r$  を種々に変化させた場合の一覧表を、付録2におい

て示している。

## 5. 評価式にもとづく計算例

ここでは、以上に述べてきた方法を用いて、800<sup>m</sup>角の地域に2件の出火が予想される場合の安全度を、例として求めてみた。なお、避難開始時間は出火後20分とし、延焼速度は4<sup>m</sup>/分とするが、これは、家屋長8<sup>m</sup>、隣棟間隔が2<sup>m</sup>の地域に、平均11<sup>m</sup>/sec程度の風が吹いた時の、浜田式風下側延焼速度である。

まず、2件出火のときの平均延焼距離は、100<sup>m</sup>角の場合の値(表3-7)を8倍して、 $L = 38.72 \times 8 = 309.8^{\text{m}}$ となり、平均延焼時間 $X_1$ には、 $X_1 = L/4 = 77.44$ 分が得られる。次に移動時間は、同じく100<sup>m</sup>角の場合の値を8倍して $0.44 \times 8 = 3.52$ 分となることから、平均避難時間 $X_2$ には、 $X_2 = 20 + 3.52 = 23.52$ 分が得られる。従って安全度 $A$ には、(3.1)式を用いて、次の77%が得られることになる。

$$A = X_1 / (X_1 + X_2) = 77.44 / 100.96 = 0.767 \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

表3-7. 100<sup>m</sup>角の平均延焼距離<sup>\*1</sup>

出火件数	1	2	3	4	5
平均延焼距離 (m)	51.87	38.72	31.95	27.70	24.71

次に、この800<sup>m</sup>角の地域を、防火帯により4つの地区に等分割した場合の安全度を求めてみる。これは、その中の1個である400<sup>m</sup>角の地区の安全度を求める問題となり、まず、各出火状態の生起確率は次の値となる。

全体で2件の出火のうち、この地区(400<sup>m</sup>角)で1、及び2件発生する場合の各確率は、(3.9)式を用いて次式で表わされる。

$$P_4(2,1) = {}_2C_1 \cdot \left(\frac{1}{4}\right) \cdot \left(\frac{3}{4}\right) = 0.3750 \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

$$P_4(2,2) = {}_2C_2 \cdot \left(\frac{1}{4}\right)^2 \cdot 1 = 0.0625 \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

<sup>\*1</sup> これは表3-2、ケース3(10×10分割)の値である。

これから、1件も発生しない確率  $P_4(2,0)$  は、次の(3.14)式で表わされる。

$$P_4(2,0) = 1 - [P_4(2,1) + P_4(2,2)] = 0.5625 \quad \cdots \cdots (3.14)$$

従って、400<sup>m</sup>角で1件、及び2件の出火が予想されるとき各安全度Aは、表3-7などの値をもとにして(3.11)式の場合と同様に算出されるので、対応する生起確率Pを乗じて  $E = \sum A \cdot P$  を求めると、4分割した場合の平均的な安全度が得られる(表3-8)。結果は約87%の安全度となり、分割を行わない場合に比べて約10%程度の上昇がみられる。

表3-8. 4分割2出火の安全度 (800<sup>m</sup>角)

出火 件数	平均延焼距離 (m)	平均延焼時間 (min)	安全度 A	生起確率 P	A × P	期待値 E
0			100.0	0.5625	56.25	Σ A・P 86.67 %
1	207.48	51.87	70.45	0.3750	26.42	
2	154.88	38.72	64.02	0.0625	4.00	
平均避難時間 = 20 + 0.44 × 4 = 21.76 (min)						

以上のようにして、対象地域の安全度を概算することが出来るが、ここで、平均延焼時間  $X_1$  と平均避難時間  $X_2$  から地区の安全度Aを求める(3.1)式について、その分子分母を  $X_1$  で割り、(3.15)式のように変形してみる。

$$A = X_1 / (X_1 + X_2) = 1 / (1 + X_2 / X_1) = 1 / (1 + \alpha) \quad \cdots \cdots (3.15)$$

$$\text{但し、} \alpha = X_2 / X_1$$

すなわち、地区の安全度Aは、 $X_2$  と  $X_1$  の比  $\alpha = X_2 / X_1$  から決まることになり、例えばAを80%程度にするためには、平均延焼時間を平均避難時間の4倍以上にする必要がある。

$$\alpha < 0.25$$

$$4X_2 < X_1 \quad \cdots \cdots (3.16)$$

これに関して、逆に、どの程度の広さの領域において1件の火災が発生するならば、安全度が80%以上になるかを次に求めてみた。なお、避難開始時間は20分とし、延焼速度も以前と同じ4<sup>m</sup>/分を用いている。

今、求める領域を一边  $n (\times 100^m)$  の正方形とすれば、平均延焼時間  $X_1$ 、及び平均避難時間  $X_2$  は、100<sup>m</sup>角の場合の値を  $n$  倍して、それぞれ次のように表わされる。

$$X_1 = n \times (51.87/4) = n \times 12.97 \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$X_2 = 20 + n \times 0.44 \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

以上の  $X_1$ ,  $X_2$  を (3.16) に代入して  $n$  を求める。

$$\begin{aligned} 4 \cdot (20 + n \times 0.44) &< n \times 12.97 \\ n \times 11.21 &> 80 \\ n &> 7.136 \quad \dots\dots\dots (3.19) \end{aligned}$$

従って、火災発生密度を、700<sup>m</sup> 角程度の周囲から延焼のない地域で、1 件程度に押さえることが出来るならば、風速 11<sup>m</sup>/sec の時に出火 20 分後に発散型の避難を行ったとしても、約 80 %の安全度は得られることになる。

## 6. ま と め

この研究は、火災の発生を全く確率的な事象と考えることにより、地区の平均延焼時間と防火帯による地区分割の効果について、その解析的な算出方法を求めてみたものである。具体的には、出火地点のランダム性を前提にして、組合せ理論を用いた定式化を行ったもので、その結果は次の 2 つの式に要約されよう。

まず平均延焼時間については、 $k$  個のメッシュに分割した対象地域において、各メッシュ  $i$  とその他のメッシュとの距離を小さいものから順に  $L_m^i$ ,  $m=1 \sim k$  とした時、任意の  $n$  個の出火メッシュとの最短距離  $L^i(n)$  は、次式で得られることがわかった。

$$L^i(n) = \sum_{m=1}^k L_m^i \cdot \left[ \sum_{s=1}^n {}_nC_s \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^s \cdot \left(\frac{k-m}{k}\right)^{n-s} \right]$$

従って、この  $L^i(n)$  を  $k$  個の各メッシュについて求めてそれを平均すれば、地区の平均延焼距離  $L(n)$  が得られ、さらにそれを延焼速度で割ることにより、地区の平均延焼時間が算出されることになる。

また、防火帯による地区分割の効果については、地域を  $k$  個のゾーンに分割した場合、その中の一つのゾーンに、全出火件数  $n$  のうち  $r$  件が発生する確率は、次の  $P_k(n, r)$  で表わすことができる。

$$P_k(n, r) = {}_nC_r \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^r \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{n-r}$$

従って、これらの算出式と、(3.1)式で示した安全度評価式を用いれば、同時多発の地震火災に対する地区の安全度を、シミュレーションによらずともある程度予測できることになる。

また、これらの算出方法によれば、木造家屋の連続する地域を、互いに延焼する危険がない  $700 \sim 800 \text{ m}$  角程度のゾーンに分割し、かつその中で発生する火災を 1 件程度に押さえることができるならば、風速  $10 \text{ m/sec}$ 、出火 20 分後の避難開始という条件のもとで全地域にわたって延焼が起こっても、約 80 % の人々は安全に避難できているという結果が得られた。従って、まずこれを一つの目安として路線防火帯を整備していくことが、全都市の不燃化という究極的な目的に対しての一つの足掛りとなろう。

#### 参 考 文 献

- 1) C. ベルジュ「組合せ論の基礎」 野崎昭弘訳 サイエンス社
- 2) ホール 「組合せ理論」 岩堀信子訳 吉岡書店



## 第2部 ケーススタディ・京都市防災計画

ここでは防災計画の骨子となる、出火分布の推定や広域避難計画の可能性、及び延焼危険に対する人々の安全度評価などの項目について、京都市を対象にして解析した例を示す。しかしこれは、第1部で述べた方法論の具体的な応用ではなく、むしろ第1部の第1章で説明した防災システム、及び第2章のシミュレーションモデルなどは、ここで得られた結果をもとにして作成されたものである。

まず第1章では、昭和40年から42年までの3年間に、京都市で発生した火災の地域分布をもとにして、多変量解析法による回帰分析を行ってみた。次に第2章では、京都市の元学区に含まれる地域を対象とした、広域的な避難計画を扱っており、シミュレーション技法を用いた計画法の解説を中心にしながら、計画解の算出を試みている。第3章では、京都市の一地区を対象にして地震時の出火件数を推定しており、火災の延焼と人々の避難を含むシミュレーションを行って、地区の安全度を試算してみた。



# 第1章 京都市における火災発生密度

## —火災発生密度の回帰分析による研究—

### 1. 概 説

この研究では、都市域での火災発生密度（出火件数/ha）を基準変数にとり、多変量解析による回帰分析を行ってみた。回帰を行うにあたり、説明変数に地域特性を表わす要因を用いて、予測が出来ると同時にそれらを都市計画の際の制御（政策）パラメータにして、計画サイドから火災発生の防止ができるか、その可能性を検討してみた。

地域特性を表わす変数として採用したものは、用途分類、人口密度、容積率、不燃化率の4種類であり、このうち用途が分類で与えられていることから、数量化のⅠ類をベースに、回帰モデルを作成してみた。

なお今回は、京都市のデータをもとに回帰を行っていることから、ここで求めた回帰式により他の都市の火災発生密度を考察する場合は、日本の全都市という母集団の中で、一つのサンプルである「京都」が、どのような位置にあるかを、十分考慮する必要がある。

### 2. 回帰モデルについて

ある要因間の関係の回帰に重回帰モデルを採用する場合には、各説明変数と基準変数の間に、両者が共に間隔尺度<sup>\*1</sup>で計測されていると同時に、線型の相関関係があることが前提となる。また数量化理論<sup>\*2</sup>のⅠ類は、数学的には、重回帰モデルの説明変数に、ダミー変数<sup>\*3</sup>を用いたものに一致し、基準変数が間隔尺度で与えられ、説明変数が名義尺度<sup>\*4</sup>（分類）で計測されている場合に有効なモデルであり、その一般形は（1.1）のようになる。

$$\hat{Y}_i = \sum_j^R \sum_k^{k_j} \hat{x}_{jk} \delta_j(jk) \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

\*1 間隔尺度（interval scale）は、身長、体重などのように数値間の間隔と距離に加法性が成立する数値で、等価な単位によって測定されており、連続量であることが一般的である。

\*2 数量化理論（quantification theory）は、林知己夫氏によって提唱された方法で、Ⅰ類からⅣ類まであり、その詳細は文献4）、5）を参照のこと。

\*3 ダミー変数（dummy variable）とは、一つのカテゴリのみに1がついて、他がすべて0になる変数である。

\*4 名義尺度（nominal scale）は、職業名、病名など、離散量で数値間の順序も意味をもたず、アルファベットなどの分類で与えられる数値である。

$\hat{Y}_i$  : 標本  $i$  の回帰値

$R$  : アイテム ( 要因 ) 数

$k_j$  :  $j$  アイテムのカテゴリー数

$\hat{x}_{jk}$  :  $j$  アイテム,  $k$  カテゴリーの回帰係数

$\delta_i(jk)$  : 反応パターン

$\delta_i(jk) = 1 \cdots i$  なるものが,  $j$  アイテム  $k$  カテゴリーに反応しているとき  
 $= 0 \cdots$  しからざるとき

なお数量化Ⅰ類では, 重回帰との合成モデルを考えることにより, 説明変数の中に間隔尺度で与えられている要因が混在する場合も扱うことができ,  $L$  個の要因が連続量で与えられ,  $R$  個の要因が分類で表わされている場合の一般形は, 次の (1.2) 式で表わされる。

$$\hat{Y}_i = \sum_{\ell}^L \hat{\omega}_{\ell} \cdot z_{\ell}(i) + \sum_j^R \sum_k^{k_j} \hat{x}_{jk} \cdot \delta_i(jk) \quad \cdots \cdots \cdots (1.2)$$

$\hat{\omega}_{\ell}$  :  $\ell$  アイテムの回帰係数

$z_{\ell}(i)$  :  $i$  なるものの  $\ell$  アイテムの値 ( 連続量 )

しかしこの合成モデルでも, 間隔尺度の要因  $z_{\ell}(i)$  と外的基準  $Y$  の間には, やはり線型の相関関係が存在することが必要で, 満足できる相関関係が得られない場合には, この間隔尺度で与えられている要因を任意に分割して, 名義尺度である分類, すなわち要因のカテゴリー化という一種の線型変換を行うことにより, うまく回帰できる場合がある。これは, ある説明変数  $x$  に関して, 1 個の回帰係数では外的基準  $y$  との間に線型な相関関係が得られないものを, 数個のカテゴリーからなる要因に変換し, その線型 1 次結合で与えられる合成変数  $y'$  と外的基準  $y$  との間に, 新たな線型の相関関係を求めるものである。しかし重回帰も含め, このような線型 1 次結合のモデルでは, 説明変数の数 ( カテゴリー数 )  $P$  が, サンプル数  $N$  に対して  $P \geq N$  なる関係にある場合, 重相関係数が 1 となる回帰モデルを作成することも可能であり, 単にカテゴリーの数を増すことには意味がない。したがって重回帰分析において, 出来るだけ少ない変数で重相関係数を高めるため, 前進選択手順 ( forward selection procedure ) といった方法で説明変数の選択が行われるのと同様に, 数量化Ⅰ類においても, 出来るだけ少ないカテゴリー数で重相関係数を高めるようアイテムの分割を行うことが必要である。またサンプル数  $N$  が説明変数の数  $P$  に比してあまり大きくない場合には, 自由度を考慮した重相関係数を用いるなどの配慮が必要であろう。

### 3. 変数値の作成

京都市において、用途地域、人口密度、容積率などの地域特性の経年変化を調べたものとしては、京都市計画局により作成された「土地利用現況調査資料(1)」<sup>8)</sup>がある。これは、京都市の市街化区域全般にわたって調査されたもので、この研究でもその調査区域を用いることにしたが、総数 380 のゾーンのうち、昭和 43 年次の用途分類が確定しており、かつ農耕地、山岳、荒地等に割付けられたゾーンを除外した中で、人口密度、容積率のデータとも整った 228 の調査区をサンプルとした。なお、そのゾーンの面積には、大きさに 10～80ha の開きがある。

#### 3-1 基準変数の作成

出火の地域変化を表わす値には、各ゾーンの一年間の出火件数を、その人口（1万人単位）で割って求める出火率があるが、ここでは説明変数に人口密度を用いたので、面積割の値を用いることにした。しかし、都市域全体を対象としたためか 1 年間の出火件数ではゾーン格差が出ず、統計的に意味のある量を得るために昭和 40 年から 42 年までの 3 年間に発生した件数を用いており、これをゾーンの面積（ha 単位）で割って基準変数を作成した。従って、1 年間の出火件数から求めるいわゆる出火密度とも異なるので、ここではこれを火災発生密度と呼ぶことにした。

京都市全体で火災として登録された件数は、図 1-1 のごとく毎年減少傾向にある。しかし、全出火件数から走行中の車輛火災などを除いた建物火災のうち、さらに放火、不審火を除外した出火件数では、昭和 40～42 年の値が 238、226、246 とほぼ一定になっている（図 1-1、破線部分）。従って、ここではこの意図せずして建物火災となった出火件数

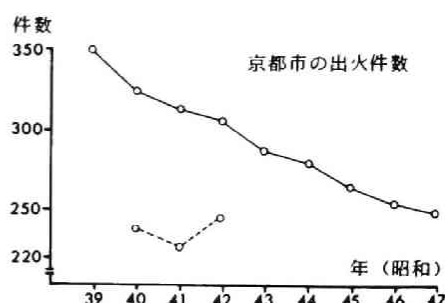


図 1-1. 京都市の出火件数

を外的基準に用いているので、この 3 年間を一つの単位時間として扱っても、問題はないと考えられる。図 1-2 に、この出火件数の地域分布を示す。

#### 3-2 説明変数の作成

##### (1) 不燃化率

説明変数には、用途分類、人口密度、容積率、不燃化率を考えたが、このうち不燃化率は、

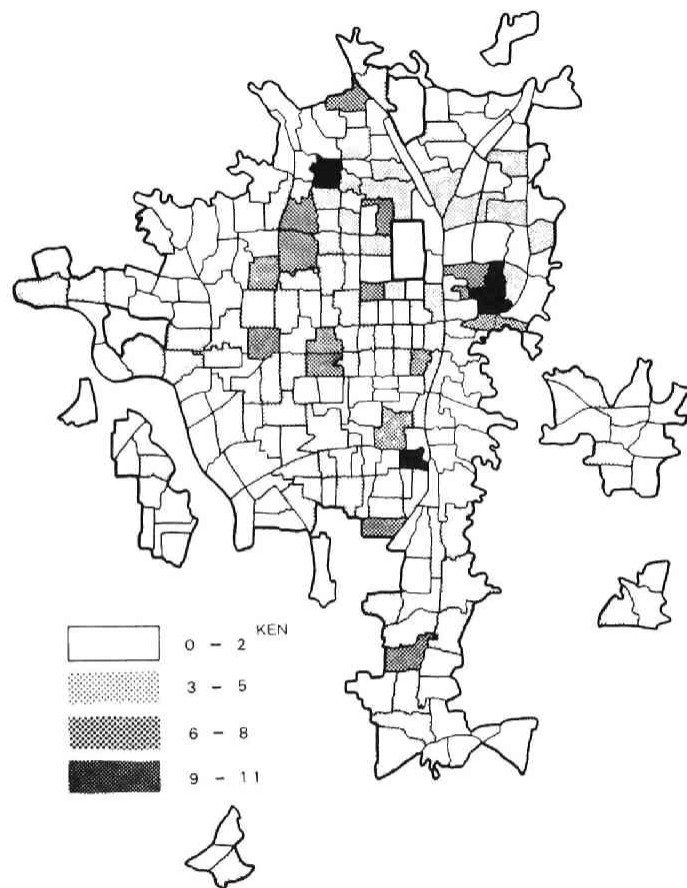


図1-2. 出火件数分布  
(昭和42～42年の累計値)

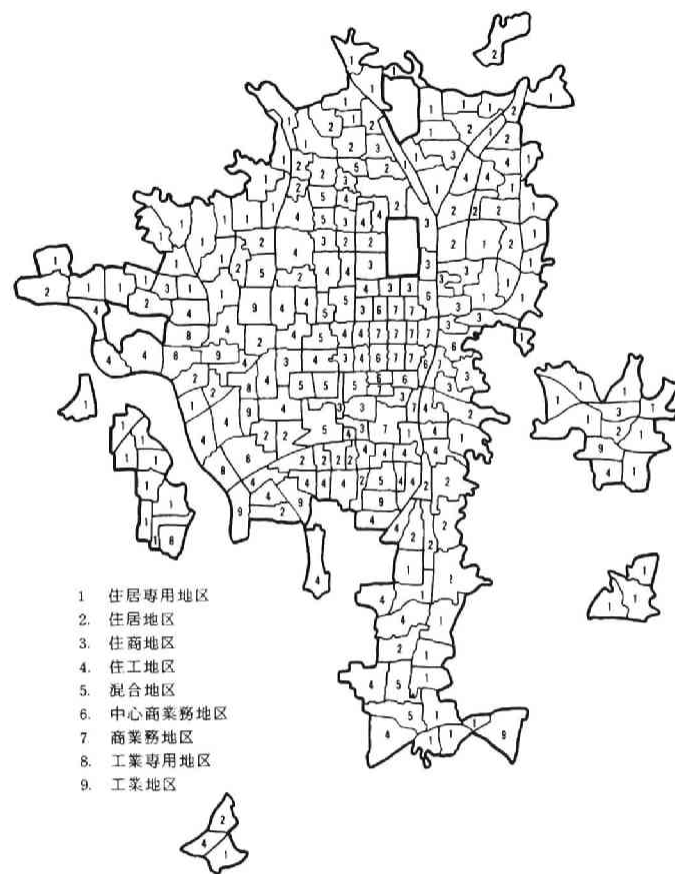


図1-3. 用途分布

得られたデータが京都市計画局の「建築物容積現況調査報告書」<sup>9)</sup>による昭和41年度の調査結果だけで、それも市の中心部のみ(62元学区)を対象としたものである。したがって、ここでの対象地域と対応がとれた62ゾーンについてのみ、不燃化率と火災発生密度との単相関を調べたところ  $r = 0.036$  と低い値となったので、さらに「火災発生密度と不燃化率に母単純相関なし」という仮説のもと、相関係数に関する  $t$  分布検定を行ってみた。

$$t_0 = |r| \cdot \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = 0.279 \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

ただし  $n$  (サンプル数) = 62

結果は  $t$  値が (1.3) のようになり、有意水準に  $\alpha = 0.05$  をとると、自由度 60 のときの  $t$  値が  $t_\alpha = 0.679$  から  $t_0 < t_\alpha$  が成立し、95% の確かさで仮説が採択される。従って、不燃化率は火災の発生密度に何らの影響も与えていないことが確かめられたので、これを説明変数から外すことにした。

## (2) 用途分類

用途分類には、資料8)に用いられている分類をそのままカテゴリーとして採用しており、それを表1-1に示す。また各ゾーンには、昭和43年次に確定している用途別面積構成比の中で、最も大きな値を示す用途が与えられており、これを図1-3に示す。

表1-1.

用途分類	
1.	住居専用地区
2.	住居地区
3.	住商地区
4.	住工地区
5.	混合地区
6.	中心商業地区
7.	商業地区
8.	工業専用地区
9.	工業地区

## (3) 人口密度、容積率

外的基準とした火災発生密度が、昭和40年から3年間の累計値をもとに作成されているので、説明変数の人口密度や容積率についても、3年間の変動を許した値の与え方が必要となってくる。これは2つのゾーンの間に於いて、3年間の変動(経年変化)を越える以上の値の差があった場合に、はじめてそれをゾーン格差としてとらえられるような測定尺度を作ることを意味しており、ここでは以下示すような区間分割を行って、その目盛を作成してみた。

### 区間分割(目盛)の条件

1. あるゾーン  $i$  について、その3年間のどの時間断面の値をとっても、それが同じ一つの区間に入るような分割幅で目盛がつけられていること。

Ⅱ. さらに、異なるゾーン  $\ell, k$  について、ある時間断面で同じ値をとることがあった場合には、両ゾーンとも、その3年間のどの値をとっても、同じ一つの区間に入っているような目盛であること。

これは図1-4で示されるように、極端な場合として、 $\ell$  ゾーン、 $k$  ゾーンの間、40年の値が等しく ( $x_{\ell 1} = x_{k1}$ )、41、42年度の値が、それぞれ毎年  $\Delta x_\ell, \Delta x_k$  だけ変化するような関係があっても、どの  $x_{im}$  ( $i = \ell, k, m = 1, 2, 3$ ) も、同じ一つの区間Dに入るような分割方法で、目盛がつけられていることを意味する。

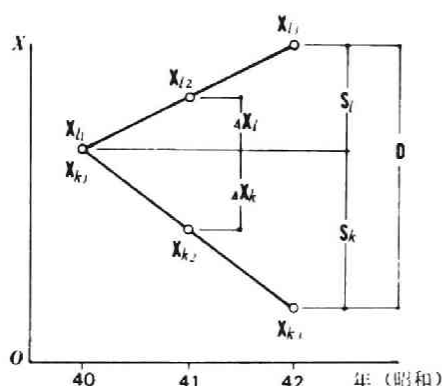


図1-4.

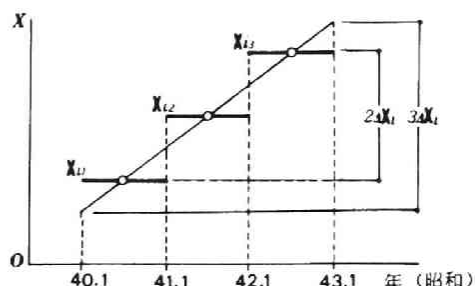


図1-5.

なお図1-5に示すように、ゾーン  $i$  個々について生ずる変動は、毎年の変化量を  $\Delta x_i$  (一定) としたとき、その変化が連続的に行われるとすれば、3年間の変動幅として  $3 \times \Delta x_i$  を考えることもできる。しかし今回の場合、毎年  $x_i$  がその年1年間の値を代表するものとみなしたので、 $S_i = 2 \times \Delta x_i$  をもって3年間の変動幅とした。次にこの  $S_i$  ( $i = 1 \sim 228$ ) が全ゾーンについては正規分布に従うとすると、平均値を  $m$ 、標準偏差を  $\sigma$  として、228のうち、95%程度のゾーンについての変動を内包できる区間は、次のDで与えられる。

$$D = \max[4\sigma, |m+2\sigma|, |m-2\sigma|] \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

このうち  $4\sigma$  は、経年変化に伴う変化量 ( $m$ ) より、ゾーン間での変動 ( $2\sigma$ ) の方が大きい場合の区間幅で、これを図1-6に示す。一方、 $|m+2\sigma|$  及び  $|m-2\sigma|$  は、経年変化自体の方が大きく、図1-7のような状態のときの分割幅である。

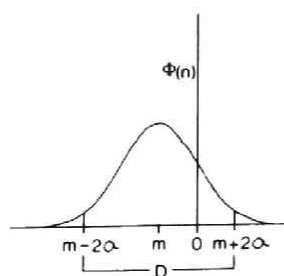


図 1-6.

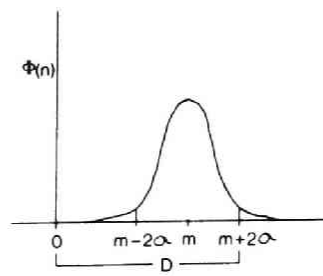


図 1-7.

なおこれを図 1-4 についていえば、昭和 40 年の値を  $m$  としたとき、昭和 42 年の値 ( $x_{k3}$ ,  $x_{k3}$ ) が平均どれくらい離れているかが、図 1-6 あるいは図 1-7 の分布曲線に従うことを意味する。

以上のようにして求めた区間  $D$  が、基準となる間隔尺度の最小分割値 (目盛) となり、連続変量で与えられているデータをこのような分割を行った尺度にあてはめた場合、各ゾーンの反応値としては、対応する区間の中間値が与えられることを意味する。従ってこれは連続変量を、その値の変動のバラツキを考慮して、離散変量に変換する処置であるといえよう。

このような考えのもとに行った、人口密度及び容積率の基準分割を以下に示す。

#### (a) 人口密度

資料 8) の人口密度から単純回帰により、各ゾーンの毎年の変化量 (回帰係数)  $\Delta x_i$  を求め、さらに 3 年間の変化量としての  $S_i = 2 \times \Delta x_i$  の分布を調べたところ、平均値  $m = -2.81$  人/ha、標準偏差  $\sigma = 14.11$  人/ha となった。これが正規分布に従うとして、全体の 95% 程度の変動を含む区間を (1.4) 式から求めたところ、 $D = 4\sigma = 56.4$  人/ha が最大となったので、ここでは 50 人/ha を最小分割値とした。

#### (b) 容 積 率

人口密度と同様にして求めた結果、 $m = 5.76\%$ 、 $\sigma = 6.46\%$  となり、同じく 95% のものを含む区間としては、 $D = 4\sigma = 25.8\%$  が得られたので、ここでは 25% を最小分割値として採用した。

従ってこれらの基準分割は、表 1-2、1-3 のようになり、また、その地域分布の概略は、図 1-8、1-9 のようになる。

表 1-2.

人口密度 (人/ha)	
1	0 - 50
2	50 - 100
3	100 - 150
4	150 - 200
5	200 - 250
6	250 - 300
7	300 - 350
8	350 - 400
9	400 - 450
10	450 - 500

表 1-3.

容 積 量 (%)	
1	0 - 25
2	25 - 50
3	50 - 75
4	75 - 100
5	100 - 125
6	125 - 150
7	150 - 175

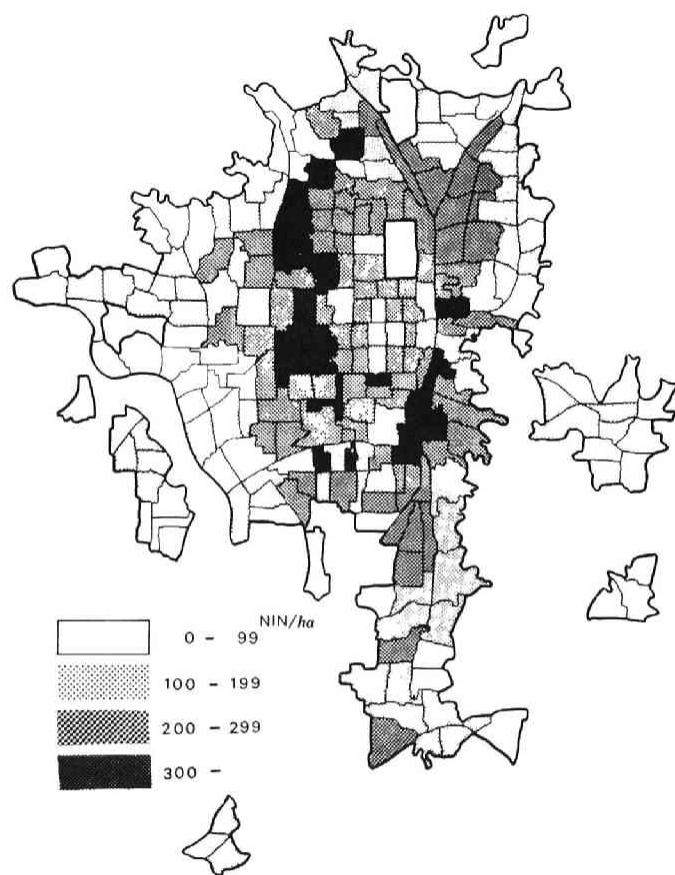


图1-8. 人口密度

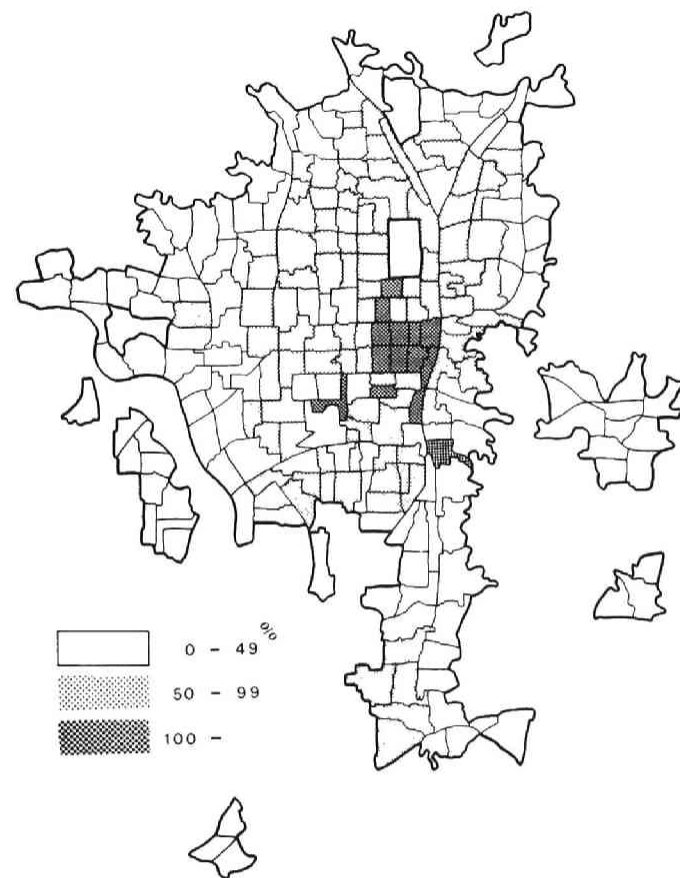


图1-9. 容积率分布



#### 4. 回帰式の決定

3. で求めた目盛により計測した人口密度と容積率について、外的基準である火災発生密度との単純相関係数を求めてみたところ、人口密度  $r_p = 0.415$ 、容積率  $r_q = 0.466$  となった。したがって線型関係が明白でないので、これらを間隔尺度のまま用いた合成モデルで回帰を行う一方、名義尺度である分類に置き換えて、数量化Ⅰ類による回帰も行ってみた。

まず合成モデルの結果を示すと、回帰係数は表1-4のようになり、重相関係数には  $R = 0.511$  が得られた。なお表1-5の相関行列は、回帰式から得られた値をもとにして算出されたものである。

表1-4. 回 帰 係 数

アイテム	カテゴリー	回帰係数 ( $\times 10^{-3}$ )
用途分類	1 住居専用地区	-1.1
	2 住居地区	15.4
	3 住商地区	15.6
	4 住工地区	16.9
	5 混合地区	10.6
	6 中心商業地区	14.4
	7 商業地区	31.4
	8 工業専用地区	25.6
	9 工業地区	35.1
人口密度 (人/ha)		13.7
容 積 率 (%)		69.5

表1-5. 相 関 行 列

	出火密度	用途分類	人口密度	容 積 率
出火密度	1.000	0.332	0.405	0.470
用途分類		1.000	0.280	0.440
人口密度			1.000	0.613
容 積 率				1.000

表1-6.

偏 相 関 係 数			重 相 関 係 数
用途分類	人口密度	容 積 率	
0.159	0.167	0.241	0.511

次に、すべてカテゴリーに分類したⅠ類モデルでは、1. で述べたように、できるだけ少ないカテゴリー数で重相関係数の高い回帰式を作成することに意味があるので、ここでは、得られたカテゴリーウェイト（回帰係数）の値を比較し、隣り合うカテゴリー間でそのウェイト値がほぼ同じものは、同一の分類として一つにまとめていく方針をとった。なお、ウェイト値に急激な変化が生じているところでは、逆に分割を細くすることにより、重相関係数を上げることができるが、3. で述べた3年間の変化量を含む分割幅の問題から、基準とした尺度の最小目盛を越える分割には意味がない。従って、ここでは、ある一定水準の重相関係数を維持した上で、その要因のカテゴリー数を減らすことのみを行っており、これは重回帰モデルにおいて、説明変数を減らしていく後退消去法（backward elimination procedure）に相当するものである。

このような考えのもとに行った回帰過程を、表1-7に示す。

これによると、最終段階(3rd)では、カテゴリー数が1stに比べ4個減少しているが、重相関係数は  $R = 0.548$  とあまり変わっていない。

以上の結果、I類モデルの方で、多少ながら合成モデルより高い重相関が得られたので、これを最終的な回帰モデルとすることにした。

表1-7. カテゴリー化

人口密度のカテゴリー (人/ha)	ウェイト( $\times 10^{-3}$ )		
	1st	2nd	3rd
0 - 50	-6.1	-4.3	-8.2
50 - 100	-21.2	-18.1	-21.0
100 - 150	-17.2		
150 - 200	-1.4	2.1	3.5
200 - 250	5.5		
250 - 300	23.5	22.0	25.3
300 - 350	49.6	48.7	51.6
350 - 400	24.8	22.0	26.7
400 - 450	-6.9	-7.7	-3.6
450 - 500	-40.0	-40.9	-41.6
偏相関係数	0.292	0.282	0.315
容積率のカテゴリー (%)	ウェイト( $\times 10^{-3}$ )		
	1st	2nd	3rd
0 - 25	-28.5	-30.6	-26.3
25 - 50	-7.7	-8.6	-4.6
50 - 75	0.0	0.7	
75 - 100	21.2	23.2	20.1
100 - 125	33.1	34.2	30.7
125 - 150	32.9		
150 - 175	172.9	179.7	176.0
偏相関係数	0.296	0.315	0.294
重相関係数	0.550	0.549	0.548

表1-8. カテゴリーウェイト

アイテム	カテゴリー	ウェイト ( $\times 10^{-3}$ )	SAMPLE NO.
用途分類	1. 住居専用地区	-13.9	67
	2. 住居地区	4.1	44
	3. 住商地区	5.2	24
	4. 住工地区	4.0	51
	5. 混合地区	-0.2	10
	6. 中心商業地区	-12.4	6
	7. 商業地区	21.6	12
	8. 工業専用地区	7.7	6
	9. 工業地区	24.0	8
人口密度 (人/ha)	1 0 - 50	-8.2	14
	2 50 - 150	-21.0	75
	3 150 - 250	3.5	90
	4 250 - 300	25.3	22
	5 300 - 350	51.6	17
	6 350 - 400	26.7	7
	7 400 - 450	-3.6	2
	8 450 - 500	-41.6	1
容 積 率 (%)	1 0 - 25	-26.3	20
	2 25 - 75	-4.6	160
	3 75 - 100	20.1	34
	4 100 - 150	30.7	13
	5 150 - 175	176.0	1

表1-9. 相 関 行 列

アイテム	用途分類	人口密度	容積率	出火密度
用途分類	1.000	0.324	0.200	0.318
人口密度	0.324	1.000	0.323	0.447
容 積 率	0.200	0.323	1.000	0.406
出火密度	0.318	0.447	0.406	1.000

表1-10.

偏 相 関 係 数			重相関係数
用途分類	人口密度	容積率	0.548
0.181	0.315	0.294	

## 5. 結果の考察

数量化Ⅰ類により、最終的に得られた回帰結果は表1-8, ~1-10 のようになった。このうち表1-8のカテゴリーウエイトは、回帰により直接得られた係数を、さらに規準化(normalization)して、各アイテム内におけるカテゴリー間の相対的な効果を、理解しやすいようにしたものである。

表1-10のごとく、重相関係数は  $R = 0.548$  で十分な回帰が得られたわけではないが、それをふまえて各要因の考察を行うと次のようになる。

### a) 用途分類

カテゴリー数が最も多いのかかわらず、偏相関係数は低い値となり、用途分類は火災発生密度にほとんど影響を与えていない結果となった。

### b) 人口密度

密度の増加につれ、火災発生密度も高まる傾向がみられるが、ある値(350人/ha)を越えると逆に低下の方向に向かっている。ただし、7,8分類については反応サンプル数が少なく、カテゴリーウエイトの信頼性に疑問が残る。

### c) 容 積 率

容積率の増加と共に、カテゴリーウエイトも増している。したがって容積率の高い地区では火災発生の確率が高いことになるので、他への延焼をなくすため、建物の不燃化や消火設備などの対策を充実しておく必要がある。

## 6. ま と め

地域特性を示す変数により、火災発生密度の回帰分析を行ってみたわけであるが、この種のデータをもとにした解析では、どのような資料が入手できるかで、適用できる回帰モデルやさらにはその結果まで決定されてしまい、非常にデータ指向(data oriented)の強いことがその特徴である。

ここでの回帰結果については、重相関係数が  $R = 0.548$  とあまり高くないので、回帰式としてはやや説得力を欠くことになる。ただし、説明変数から外した不燃化率について、それが火災発生密度とは何らの関係もないということは留意すべきで、これは不燃建築物の中でもよく火災が発生していることを意味するものであろう。

またこの回帰とは別に、ここで外的基準として作成した各ゾーンの火災発生密度  $d_i$  を用いて、

ゾーン i の出火確率  $p_i = d_i / \sum d_i$  を計算すれば、出火件数の分布予測が可能となる。これは、例えば地震時においてもこの出火確率がスライドできるとすると、全市で N 件の出火が予想されるとき、ゾーン i での発生件数は次の  $n_i$  で求められる。

$$n_i = N \cdot p_i = N \cdot d_i / \sum d_i$$

最後に、名義尺度の説明変数を持つ数量化Ⅰ類では、その誤差項に、重回帰モデルでは与えられる正規分布の仮定が成り立たず、回帰係数の検定や信頼区間の推定を行えないことが問題点として残る。従って、この回帰においても、Ⅰ類モデルから算出される基準変数値の微妙な違いに、どのような意味があるのか疑問の点もあり、説明変数が名義尺度で計測されていることからして、外的基準も分類である数量化Ⅱ類を用いてみることも、一つの方法であろう。

#### 参考文献・資料

- 1) 竹内啓, 柳井晴夫「多変量解析の基礎」 東洋経済新報社
- 2) 奥野忠一他「多変量解析法」 日科技連
- 3) 守谷英一, 井口晴弘「多変量解析とコンピュータプログラム」 日刊工業新聞社
- 4) 林知己夫, 村山孝喜「市場調査の計画と実際」 日刊工業新聞社
- 5) 林知己夫他「情報処理と統計数理」 産業図書
- 6) 林知己夫「数量化理論とその応用例(V)」 統計数理研究所彙報 第8巻 第2号  
1961
- 7) 「火災便覧」 日本火災学会 理化書院
- 8) 「土地利用現況調査資料(1)」 京都市都市計画局 昭和48年4月
- 9) 「建築物容積現況調査報告書」 京都市計画局 昭和42年
- 10) 「火災旬報」 京都市消防局防災救急課調査係 昭和40～48年
- 11) 堀内三郎, 小林正美, 二村洋一「火災発生密度の回帰分析による研究」 日本建築学会  
近畿支部研究報告集 計画系 昭和50年6月
- 12) 同上 秋季大会学術講演梗概集 計画系 昭和50年10月
- 13) 同上 日本建築学会論文報告集 第240号 昭和51年2月

## 第2章 京都市広域避難計画

### —都市域における避難計画の研究—

#### 1. 概 説

京都市のような大規模な市街地において、大地震に伴う同時多発性の火災が発生した場合には、現状のように建物の大部分が木造であり、かつ、消防力もその水利を主として上水道の消火栓に依存し、しかも道路交通の混雑が予想される状態では、火災の延焼は避けられず、これらの危険から市民の生命を守るためには、安全な広域避難地へ誘導避難させるほかに方法がないと考えられる。

この研究では、広域的な避難計画をシミュレーション技法を用いて求めることを目的としており、以下のような前提のもとにモデルを作成してみた。

- (1) このモデルは、地震時における都市的規模の避難計画、すなわち「市民全員が安全と考えられる避難地へ可能な限り速やかにかつ安全に避難するためには、どのような経路を通じてどこへ誘導されれば良いか」ということに対しての、最適な計画を得ようとするものである。
- (2) 避難者の行動は「目的地への移動」のみに限定しており、それも避難行動を「計画する」という立場から静然とした移動状態を前提としており、計画が達成された段階においては、適確な情報に基づく避難が行われるとして、パニック的な行動は対象にしていない。

図2-1は、この避難計画シミュレーションの作業過程（ジョブフロー）を示すもので、避難群集流動シミュレーションモデル（EES）と避難地選定モデル（DSD）の2つのモデルを作成したのち、3段階にわたるシミュレーションを行っている。このうちEESは、種々の条件下の避難状況をシミュレートできるモデルで、ネットワーク化された都市における、時系列的な状態変化をトレースすることができる。一方、DSDモデルは、各避難地の収容可能人員を越えることなく、避難者を最小の移動量（人数×移動距離）で配分できるO-D（Origin & Destination）を求めるモデルであり、STEP3においては、EESモデルとこの解析的な特性を持つDSDモデルを組み合わせて用いることにより、最適な避難計画解の算出を試みている。

なおこのシミュレーションでは、避難状況の理解を容易にするため、CRTを用いてアウトプットのグラフィック化を行っており、結果はすべて16mmフィルムに撮影してある。

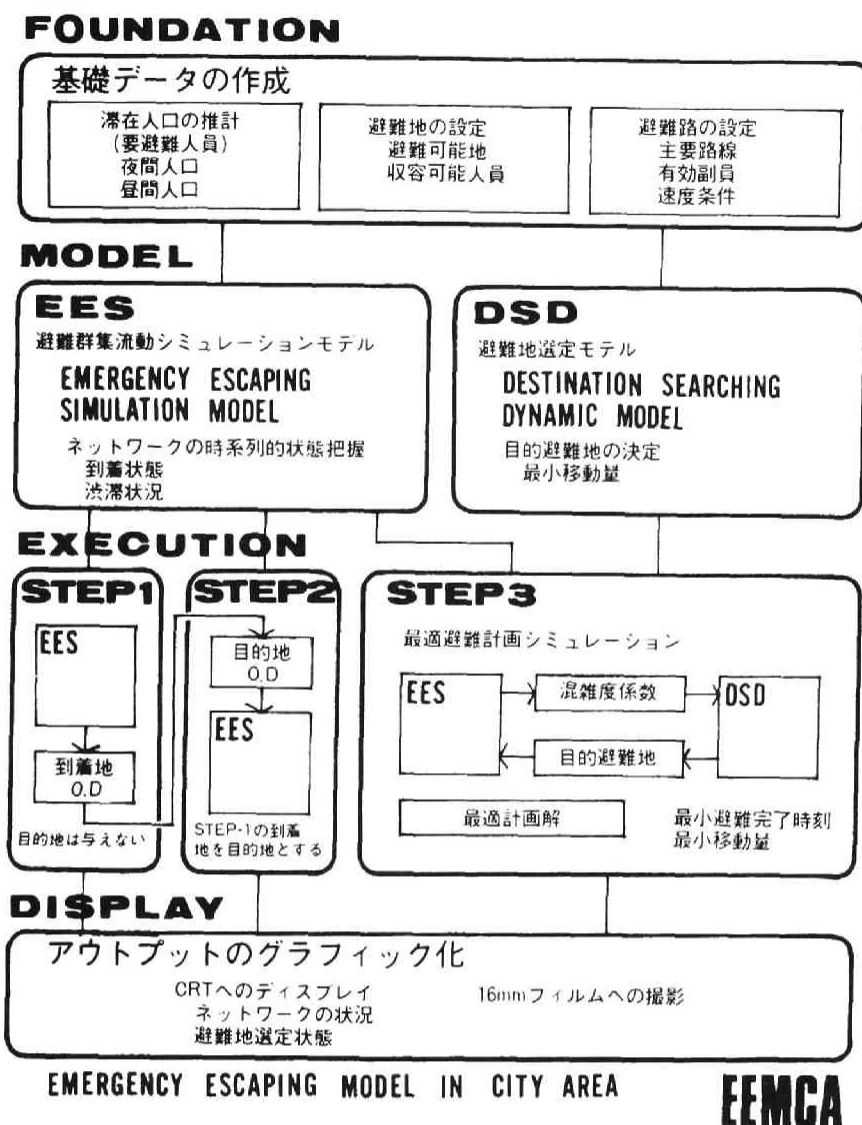


図 2-1. ジョブフロー

## 2. 基礎データの作成

### (a) 対象地域

都市域の避難計画の場合、どこまでを対象とするかの領域設定は重要な問題であり、ケース別の検討が必要であろうが、都市は一般に中心部高密度地域のまわりに低密度の地域を有し、周辺に行く程延焼の危険も少なく、安全な区域への避難も比較的容易に達成されと考えられる。従ってここでは要避難対象域を都市中心部とし、避難地には周辺の安全域、及び領域内に

ある有効な空地を考えた。京都市の場合、鴨川、北大路、西大路、国鉄京都線で囲まれる上京、中京、下京の3区（62元学区）を、この研究での対象域とした。

#### (b) 要避難人員の推計

対象域内の滞在人口は、一日のうちでも各時刻により非常に流動的であり、その人数を各地区ごとと正確に把握するためには、さらに一つの群集流動モデル<sup>\*1</sup>を作成する必要がある。ここでは統計値として把握されている人員を対象として、昼間人口＝常住人口－流出入口（就業，就学）＋流入人口（就業，就学），夜間人口＝常住人口，から求めており、京都市の対象域では、昼間約50万人、夜間で約35万人となった。<sup>\*2</sup> 従って買物、観光などの自由目的による流入人員は考慮していないので、特に観光客などの出入が多い京都では、これらも含めた滞留人員の推計が今後の課題となろう。

#### (c) 地区のモデル化

対象地域はゾーンとスペースに分割されており、それらはリンクとノードからなるネットワークで結ばれている。ゾーンは避難行動をとる場合の地区単位であり、そこからの出口としてのノードを1個持つように分割されている。スペースは避難地で、面積1ha以上の空地をプロットしており、その収容可能密度は0.5人/m<sup>2</sup>とした。一方避難経路としてのリンクには、原則として幅員20m以上の主要幹線路をあてており、ノードには、その交差点、及びゾーン、スペースの出入口が対応する。

京都市の場合、62の元学区をさらに近接ノードごとに再分割すると139個のゾーンになり、スペースには領域内及び周辺に存在する31ヶ所の空地を選出してみた。これを図2-2のゾーン、スペース図に示す。またネットワークは図2-3のようになり、ノード数は全部で50個である。

#### (d) リンクの有効幅員

避難路線（リンク）を避難者が通過する速度は、その群集密度に従うものとするが、これはリンクの長さ、有効幅員、及びその区間の滞留者数により決定される値である。ここでは特に自動車交通による昼間の有効幅員の減少を取りあげており、地震災害により道路が遮断されると交通停滞が発生すると考え、次式を用いて各リンクの有効幅員の修正を行った。

\*1 都心部における一日の滞留人員の時刻変動を扱った研究としては、文献6)、7)に示すシミュレーションがある。

\*2 これらの値は、資料1)、2)をもとにして算出された昭和47年10月現在の値である。

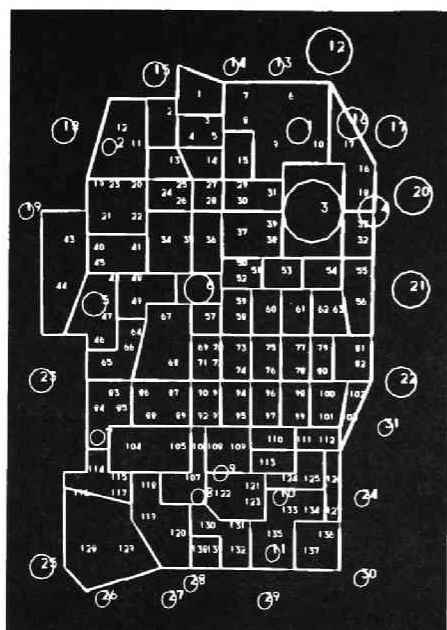


図 2-2. ゾーン・スペース

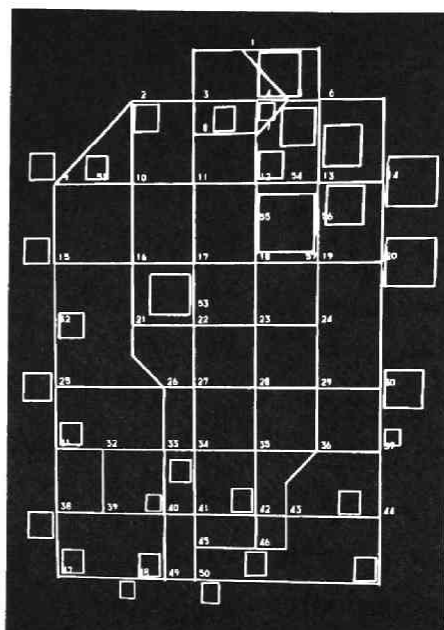


図 2-3. ネットワーク

$$D_n = D_{no} - S \cdot N_n / V_n \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$D_n$  : 第  $n$  リンクの有効幅員 (m)

$D_{no}$  : 第  $n$  リンクの幅員 (m)

$N_n$  : 第  $n$  リンクの自動車交通量 (台/sec)

$V_n$  : 第  $n$  リンクの自動車平均運行速度 (m/sec)

$S$  : 自動車一台あたりの平均占有面積 ( $m^2$ )

### 3. モデルの作成

#### 3-1 避難群集流動シミュレーションモデル (EES)

このシミュレーションモデルは、避難路線の密度、通過状況、及び避難地の到着状態の把握を目的として作成したものであり、避難状態の時系列的変化をトレースすることができる。さらに、避難地選定モデル (DSD) で定められた O-D による移動状態をチェックして、その結果を再び選定モデル (DSD) にフィードバックすれば、より最適な避難計画を検討することができる。モデルにおいて避難群集は、500 人を 1 単位とするトランザクションで表わされており、



各ゾーンから発生するトランザクションは、ネットワーク状の避難路の上を避難地に向かって移動することになるが、その行動は、以下の条件に従って制御されるものとした。

(1) ゾーンからネットワークに達するまで

各トランザクションがノードに到達するまでの時間は、地震が発生してから避難を開始するまでの準備時間と、避難を開始してからノードに至るまでの移動時間に分けて考えることができる。このうち、避難開始までの時間は、災害規模や避難情報の伝達状態、及び心理的な要因から各人により変動することが考えられるが、ここでは避難を計画するという立場から、一応これらを見捨て、全員が同時に移動を始めるものとして、シミュレーションを行った。避難開始後、各トランザクションともまず最も近いノードに向かうことになるが、そこに至るまでの時間は、距離/移動速度で与えられる。このうち距離は、要避難者がゾーン内に一様に分布していると仮定して、次の様な方法で与えている。

京都の場合、中心部の道路網はほぼ東西、南北に方向のみに限定されているため、距離は二方向で測るものとした。ゾーンとノードの距離が、図2-4のように、最短  $L_a$ 、最長  $L_b$ 、平均  $L_c$  となる時、ゾーンを次の  $L$  なる値を一辺した正方形に近似する。

$$L = (L_b + L_c - 2L_a) / 3 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

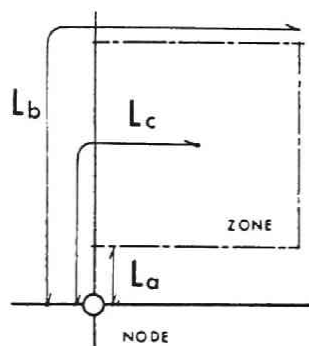


図 2-4.

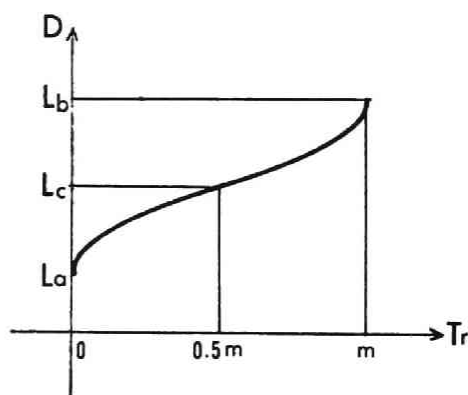


図 2-5.

このときトランザクションに与えられる距離  $D$  は、図2-5のような分布になり、 $m$  個のトランザクションが属するゾーンの  $i$  番目のトランザクションには、次の  $D(i)$  が、ノードまでの距離として与えられることになる。

$1 \leq i < m/2$  のとき

$$D(i) = \sqrt{2i/m} \cdot L + L_a$$

$m/2 \leq i \leq m$  のとき

$$D(i) = 2L + L_a - \sqrt{2(m-i)/m} \cdot L$$

.....  
..... } (2.3)

一方、この間の移動速度には、歩速代表値である  $78 \text{ m/分}^{*1}$  の一定値を用いた。

(2) ネットワーク上をスペースに到達するまで

トランザクションは、目的とする避難地に向かって、最短となる経路を選んで移動することになるが、その速度は各リンクでの群集密度に従って変化させており、次の(2.4)式で与えた。なお歩速の上限値は図2-6に示すように、 $78 \text{ m/分}$ で打ち切っている。

$$V = V_0 \cdot \rho(n)^{-0.7954} \quad \text{..... (2.4)}^{*2}$$

$V$  : 第  $n$  リンクでの歩行速度 ( $\text{m/分}$ )

$V_0$  : 自然歩行速度,  $V_0 = 66 \text{ m/分}$

$\rho(n)$  : 第  $n$  リンクの群集密度 ( $\text{人/m}^2$ )

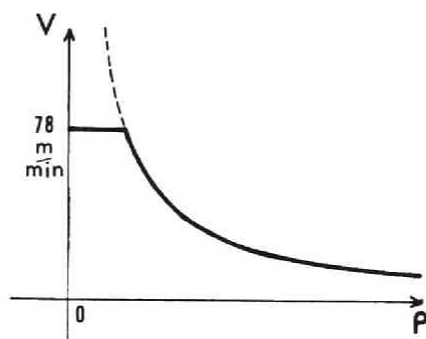


図2-6.

なお、あらかじめ各トランザクションに目的スペースが与えられている場合 (STEP 2,3) には、そこへの最短経路をそのまま移動するが、非計画時 (STEP 1) には、その時点で目的としているスペースの収容状況のチェックを、ノードに到達するごとに行っており、収容不可能 (密度が  $0.5 \text{ 人/m}^2$  を越えている) であれば、その位置から最も近い、収容可能なスペースに目的地を変更させている。図2-7に、このモデルのフローチャートを示す。

3-2 避難地選定モデル (DSD)

このモデルは、ゾーン単位の避難者を、全体としての移動量、 $\sum^n (\text{人数} \times \text{移動距離})$ 、( $n$  : ゾーン数) が最小となるように、各避難地に配分することを目的として作成したものであり、避難地の収容能力に制限を設けたことから、D.P (Dynamic Programming) の方法を用いて、

\*1, \*2 いずれも資料4)による。

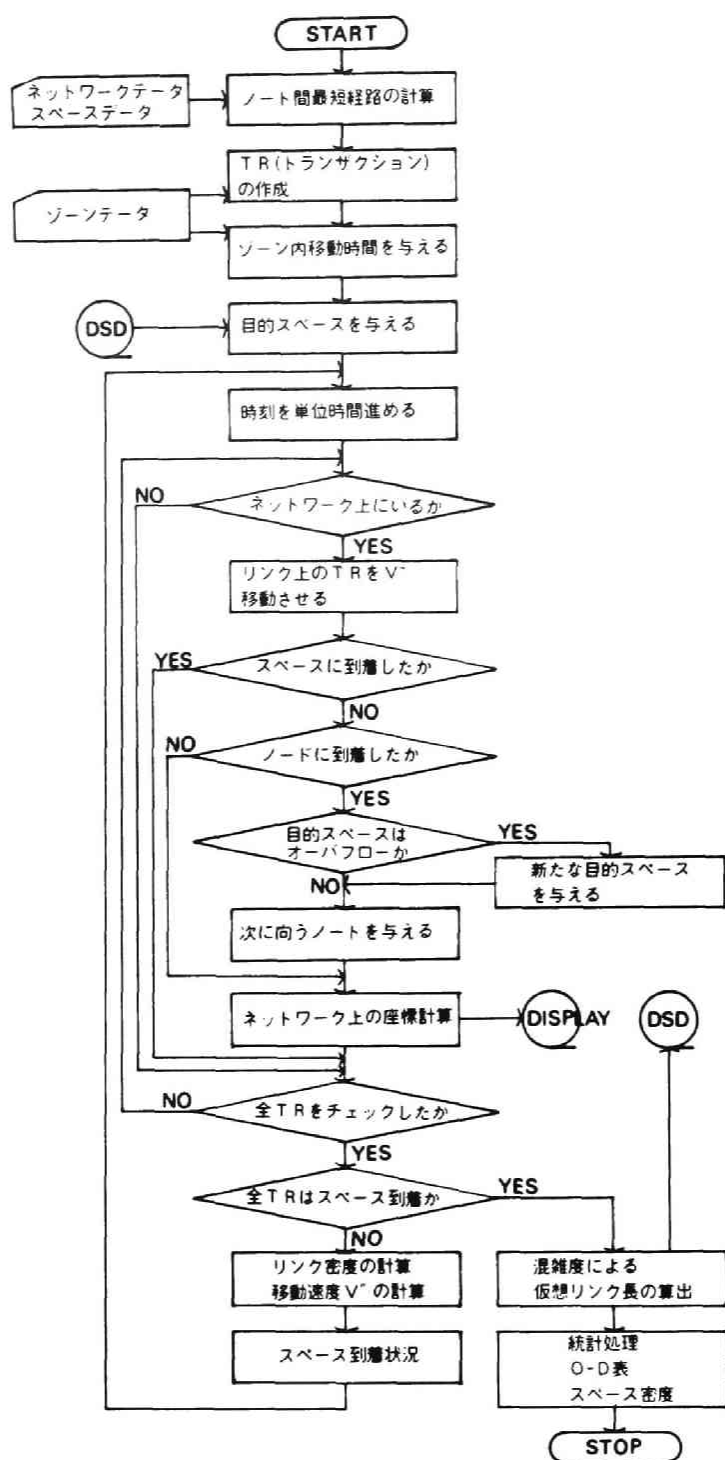


図 2-7. EES モデルフローチャート

各ゾーンの目的避難地を決定している。すなわち、各ゾーン(Origin)には、まずそこから最も近いスペースを初期の目的地(Destination)として与える。次に、このO-Dでは密度オーバー(0.5人/m<sup>2</sup>以上)となるスペースが発生する場合には、そこを目的地としているゾーンの中から、行先を他の制限密度以下のスペースに変更したときに、移動量の変化(増加)が最も少ないものを選び出し、そのゾーンの行先だけを変更する。以下、全スペースが制限密度以下になるまでこの手順を繰り返して、最終的なO-Dを決定する。なおゾーンの行先を変更する際に、そのゾーンの人員が流入することにより密度オーバーとなるスペースは、目的スペースとはならない。このDSDモデルのフローチャートを図2-8に示す。

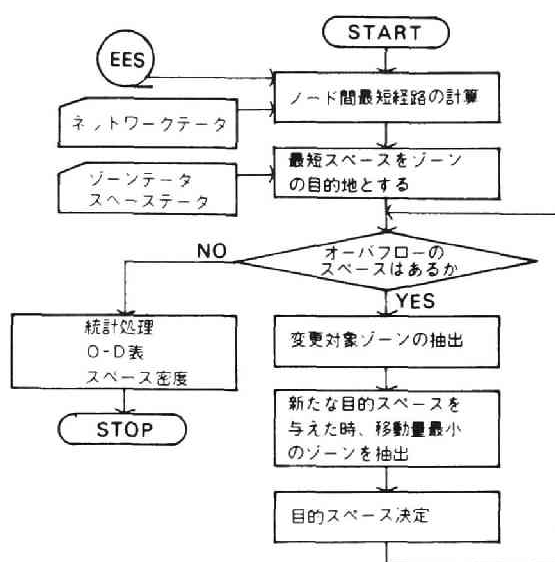


図2-8. DSDモデルフローチャート

### 3-3 最適避難計画モデル(EES + DSD)

3-2で述べたDSDモデルでは、一つの収束解を得ることはできるが、リンク上の混雑状況やトランザクションの避難地到着状況などの時間的な要素が考慮されておらず、従って最適な解とはいえない。ここではEESとDSDの2つのモデルを結合し、EESモデルにより得られるリンクの混雑状態を、次に説明する「混雑度」で表現しており、それをDSDモデルにおける避難地選択の際の制御条件として用いている。また、DSDモデルで得られるO-Dを再びEESモデルにフィードバックしており、この操作を繰り返すことにより、まず避難完了時刻、次に総移動時間 $\sum^n$ (人数×移動時間)の最小のものを収束解として、最適な避難計画を求めよう

としたものである。従ってこれも一つの D.P モデルを形成しているといえよう。

## (1) 混 雑 度

混雑は時間的な遅れ、あるいは空間的な密度などで把握されるが、ここでは、群集密度の増加により、歩速が通常のものより遅くなった状態を考えることにした。すなわち混雑がない場合、速度  $V_0$  ( $=78$  m/分) で  $t_0$  分で通過できる距離  $L_0$  の区間を、今、人々の過度な集中のために速度が  $V = V_0 - \Delta V$  に落ちて、 $t = t_0 + \Delta t$  分を要したとする。この場合  $\Delta t$  が「遅れ」となるので、その比率  $\Delta t/t_0$ 、従って  $\Delta V/V_0$  をもって「混雑度」と定義することにした。

$$\text{混雑度 } \alpha = \Delta t/t_0 = \Delta V/V_0 \quad \cdots \cdots (2.5)$$

次に、この混雑のため  $\Delta t$  の遅れを生じた区間  $L_0$  を、速度  $V_0$  で  $(t_0 + \Delta t)$  分を要する距離  $L'$  を持つ区間、とみなせば、混雑を距離に換算することができ、従って、避難地選定モデルでの制御条件として用いることが可能となる。ここではこの  $L'$  を、仮想リンク長と呼ぶことにした。

$$L' = V_0 \cdot (t_0 + \Delta t) = V_0 t_0 \cdot (1 + \Delta t/t_0) = L_0 \cdot (1 + \alpha) \quad \cdots \cdots (2.6)$$

しかし、ここで用いた混雑度にも時間的な変化があるわけで、これを選定モデル (DSD) で用いるためには、一定値にして、時間性を消去する必要がある。これには混雑度を時間で積分するなどの方法も考えられるが、避難計画としては、平均値よりむしろ最大に混雑する状態を考慮する必要があり、従って、混雑度  $\alpha$  には、最大混雑度  $\alpha_{\max}$  に、拡大率  $r$  ( $0 \leq r \leq 1$ ) を乗じた値を用いることにした。

$$\alpha = r \cdot \alpha_{\max}, \quad (0 \leq r \leq 1) \quad \cdots \cdots (2.7)$$

それ故  $L'$  は (2.8) 式で表わされ、拡大率  $r$  もまた一つの制御変数となる。

$$L' = L_0 \cdot (1 + \alpha) = L_0 \cdot (1 + r \cdot \alpha_{\max}) \quad \cdots \cdots (2.8)$$

## (2) アルゴリズム

混雑度による仮想リンク長を用いることにより、シミュレーションモデルと避難地選定モデルを結合することができる。これは、選定モデルからは目的避難地を、シミュレーションモデルからは仮想リンク長を相互に与えあうことにより、最適な避難計画を得ようとするもので、

そのアルゴリズムは次のようになる。

- 1) 避難地選定モデル (DSD) により、目的スペースを求める。
- 2) 目的スペースをあらかじめ与えた場合の避難を、避難群集流動シミュレーション (EES) により実行する。
- 3) 拡大率  $\gamma$  を決める。(例ば、最初は  $\gamma = 1$ )
- 4) 混雑度による仮想リンク長を、全リンクにわたって算出する。
- 5) 仮想リンク長を用いた DSD を実行し、目的スペースを求める。
- 6) 5) で求めた O-D による避難を EES によりシミュレートする。但し、経路選択にあたっては仮想リンク長を用いるが、トランザクションの実際の移動にはリンクの実長を用いる。
- 7) 避難完了時刻をチェックする。完了時刻が前回のシミュレーションの時より大きくなっている場合は、前回で収束しているのであるから、拡大率  $\gamma$  を変更して再び 4) 以下を実行する。また減少している場合には、その回で生じた混雑に従う仮想リンク長の修正を行うが、逆に混雑が緩和された区間は前回の仮想リンク長をそのまま与えておき、再び 5) 以下を実行する。一方、避難完了時刻が前回のものと差がない場合には、次に全移動時間を調べる。
- 8) 全移動時間 ( [人数  $\times$  移動時間] の総和 ) が前回よりも大か変化がなければ、前回で収束しているのであるから、新たに別の拡大率を設定して再び 4) 以降を実行する。また前回よりも小さい場合には、さらに小さくなる可能性があるので、7) の時と同様に仮想リンク長を変更して再び 5) 以降を実行する。
- 9) 以上をいくつかの  $\gamma$  について実行し、 $\gamma$  についての収束解を求める。それが最適な計画解であり、避難完了時刻、及び移動時間が最も小さいものとなっている。

以上が最適避難計画モデルであり、このアルゴリズムのフローチャートを図 2-9 に示す。

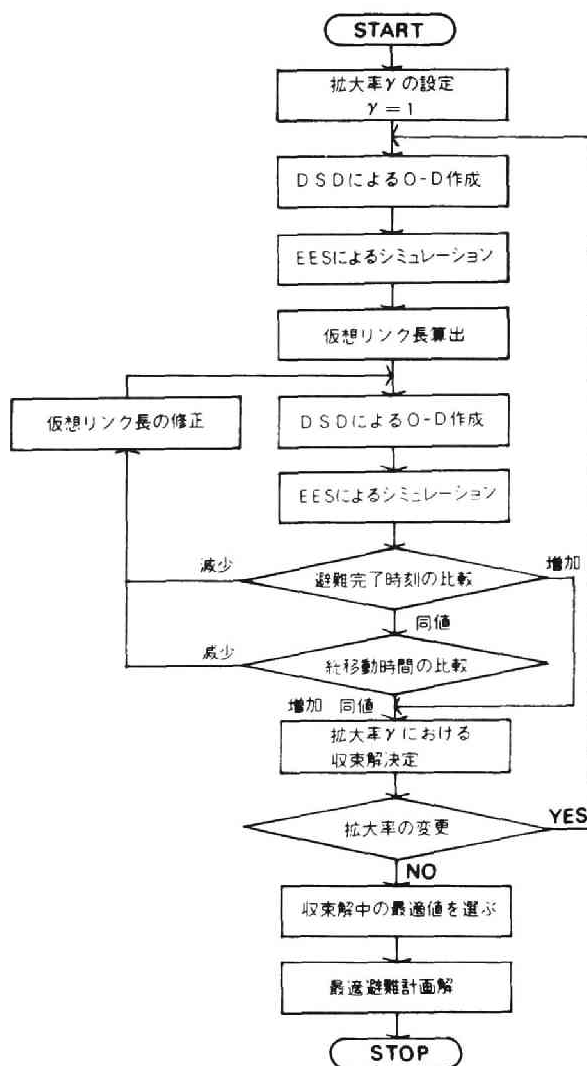


図 2-9. 最適避難計画モデルフロチャート

#### 4. シミュレーションの実行

##### 4-1 STEP1（非計画時シミュレーション）

ここでは計画時におけるシミュレーションと比較検討するため、非計画時に災害が発生した場合の避難状況をシミュレートする。しかし避難者は地理的關係を充分把握しているものとし、避難地も収容可能人員を越えて収容することはなく、収容可能か否かという程度の情報は何らかの方法で伝達されるものとする。従って、比較的制御が可能で、パニック化していない場合の避難といえよう。

これは3-1で説明したEESモデルのみを用いて行われるシミュレーションであり、各トランザクションは、まず出発地から最短距離にあるスペースに向かって移動を開始するが、ノードに到達するごとに目的スペースの収容状況を知ることができ、そこが収容不可能になった時点で、現在地ノードより最短にある収容可能なスペースに目的地を変更し、移動を続けることになる。

京都市を対象としてこの避難を行ったところ、結果は表2-1のようになった。また人々の避難地到着状況を示すと、昼間の場合が図2-10、夜間の場合が図2-11のような分布となった。なお縦軸は避難開始からの時刻(分)を表わし、横軸は、その時間1分間に避難を完了した人数(×500人)を示している。これによると、昼間の場合、全避難完了時刻は190分、95%が避難を完了するためにも150分を要すことから、避難計画の必要性は明らかであるといえよう。

表2-1. STEP1

ケース	要避難人口	避難完了時間(分)	全移動時間 (人×分)×10 <sup>3</sup>	平均避難時間(分)	避難完了時間(分) 99% (95%)
昼	497,487	190	13429.5	27.0	174 (150)
夜	351,879	66	5003.0	14.2	62 (38)

#### 4-2 STEP2 (STEP1の到着地による計画)

ここでは各トランザクションに、STEP1の非計画時において最終的に到達したスペースを、あらかじめ目的地として与えた場合の避難をシミュレートしてみた。計画として最適な解とはいえないが、無駄な経路を通ることによる時間の損失はなく、スペースの密度条件も満たされているため、一応の計画としての意味は有しているものと考えられる。なおこのシミュレーションも、STEP1と同じくEESモデルのみを用いて行われるものである。

このシミュレーションの結果は表2-2のようになり、STEP1に比べればかなりの改善がみられる。

図2-12、2-13に、それぞれ昼間及び夜間の避難地到着状況を示す。

表2-2. STEP2

ケース	避難完了時間 (分)	全移動時間 (人×分)×10 <sup>3</sup>	平均避難時間 (分)	避難完了時間(分) 99% (95%)
昼	57	8165.0	16.4	54 (51)
夜	55	4561.5	13.0	52 (35)



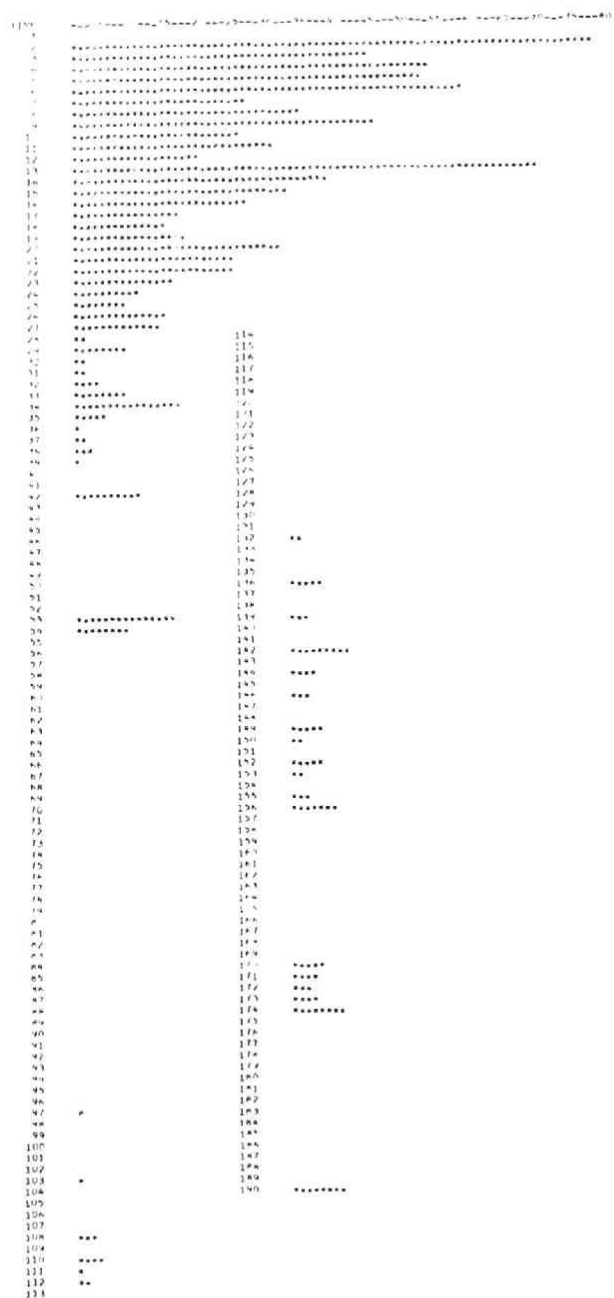


图 2-10.

STEP 1 避難地到着状況（昼間）

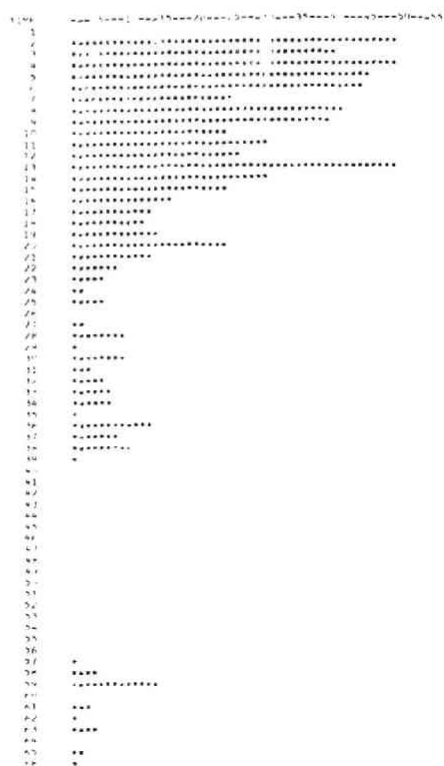


图 2-11.

STEP 1 避難地到着状況（夜間）

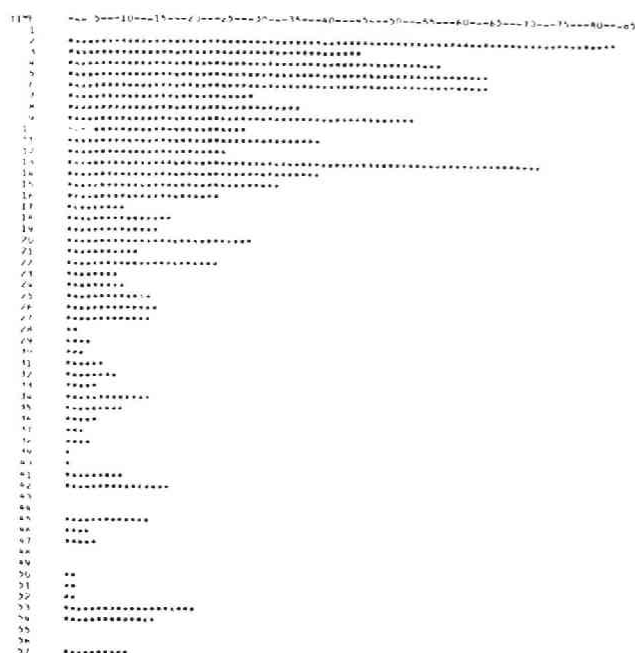


図 2-12.

STEP 2 避難地到着状況（昼間）

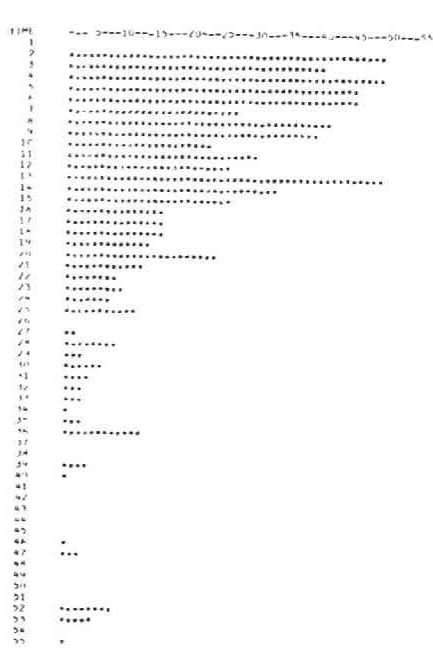


図 2-13.

STEP 2 避難地到着状況（夜間）

#### 4-3 STEP 3（最適避難計画解）

3-3で説明した、最適避難計画モデルを用いるSTEP3では、まず避難地選定モデルにより、初期状態となるO-Dを求めておく必要がある。

DSDモデルでの収束過程を示すと、図2-14のようになり、昼間人口を対象とした場合には、67個のゾーンの行先を変更した後、すべてのスペースの密度を0.5人/m<sup>2</sup>以下にすることができた。なお図2-14の横軸はスペースコードを示し、縦軸は変更回数である。また各ステップでいまだ密度がオーバーしているスペースは\*印で表わしており、右端の数字は、その結果行先を変更させたゾーンのコードを示す。このDSDモデルから得られた、STEP3の初期のO-D図を示すと、昼間の場合が図2-15、夜間が図2-16のようになった。このO-Dをもとに、EESモデルを用いて行う第1回目のシミュレーションが、最適解を求める際の初期値となり、このとき得られる最大混雑度 $\alpha_{\max}$ に、種々の拡大率 $\gamma$ を乗じて行ったシミュレーションの中から収束解を選び出すことになる。

拡大率 $\gamma$ をいろいろ変化させて行ったシミュレーション結果は、昼間が表2-3、夜間は表2-4のようになった。この手順は3-3で説明したように、初期状態の避難完了時間より小



さい値が得られた $r$ については、さらに仮想リンク長の修正を加えたシミュレーションを繰返しており、最小値が出た段階でこの操作を打ち切り、その $r$ についての収束解とした。

表 2-3. 昼 間

STEP	拡大率 $r$	回	避難完了 時間(分)	全移動時間 (人×分)×10 <sup>3</sup>	平均避難 時間(分)	避難完了時間(分) 99 % (95 %)
3-1 初期状態			42	7669.0	15.4	54 (51)
3-2	1	1	44	8127.5	16.3	41 (35)
3-3	$\frac{1}{2}$	1	41	7897.5	15.9	41 (35)
3-4		2	39	7780.0	15.6	39 (32)
3-5		3	"	"	"	" "
3-6	$\frac{1}{3}$	1	40	7733.0	15.5	39 (33)
3-7		2	41	7835.0	15.8	39 (34)
3-8	$\frac{2}{3}$	1	41	7897.5	15.9	39 (35)
3-9		2	39	7802.0	15.7	39 (32)
3-10		3	"	"	"	" "

表 2-4. 夜 間

STEP	拡大率 $r$	回	避難完了 時間(分)	全移動時間 (人×分)×10 <sup>3</sup>	平均避難 時間(分)	避難完了時間(分) 99 % (95 %)
3-1 初期状態			39	4326.5	12.3	39 (31)
3-2	1	1	39	4326.5	12.3	39 (31)
3-3	$\frac{1}{2}$	1	39	4326.5	12.3	39 (31)
3-4		2	"	"	"	" "

表 2-3 によれば、昼間の避難の場合、拡大率  $r = \frac{1}{2}$  で 2 回目 (STEP 3-4) が最適解となり、避難完了時間が 39 分と、STEP 1 の 190 分、STEP 2 の 57 分に比べて大幅に時間を短縮することができた。また STEP 3 の段階で、更に 3 分間短縮されていることから、路線の混雑状況が影響を与えていることがわかり、昼間の道路状況は重要な問題となろう。昼間の避難の、初期状態 (STEP 3-1) と最終解 (STEP 3-4) における避難地到着状況の比較を、図 2-17、図 2-18 に示しておく。

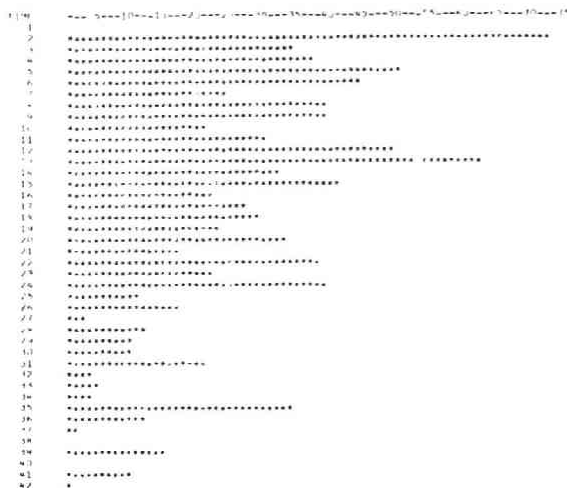


図 2-17.

STEP3-1 避難地到着状況  
(昼間、初期状態)



図 2-18.

STEP3-4 避難地到着状況  
(昼間、最適解)

一方、夜間の場合は初期状態がそのまま最適解となっており、避難人口も少ないためか、道路での混雑状況がさほど影響を与えていない結果となった。この夜間の避難地到着状況を図 2-19 に示す。

以上の結果、各ゾーンには表 2-5 に示すスペースが、最終的な目的避難地として与えられ、昼間の避難については、初期の O-D 図 (図 2-15) から表 2-5 で示した 24 個のゾーンの行先が変更されて、図 2-20 のようになった。

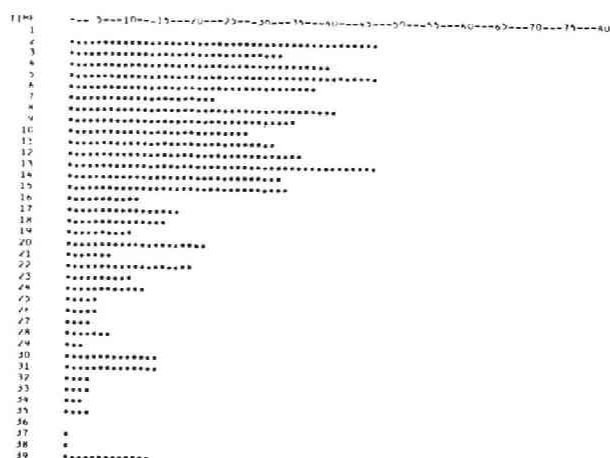


図 2-19. 避難地到着状況 (夜間、最適解)

表2-5. O-D表 [( )内は初期状態の目的スペース]

出 発 ゾーン	目 的 スペース		出 発 ゾーン	目 的 スペース		出 発 ゾーン	目 的 スペース		出 発 ゾーン	目 的 スペース	
	昼	夜		昼	夜		昼	夜		昼	夜
1	14	14	41	(6) 19	6	81	4	4	121	28	28
2	2	2	42	19	19	82	22	22	122	28	28
3	(14) 13	14	43	(19) 5	5	83	23	7	123	28	28
4	15	15	44	5	5	84	25	25	124	31	24
5	1	1	45	19	19	85	25	25	125	24	24
6	13	13	46	23	23	86	23	23	126	24	24
7	(14) 15	14	47	(5) 23	5	87	9	9	127	11	11
8	(14) 1	1	48	(6) 19	6	88	25	25	128	25	25
9	(3) 1	1	49	6	6	89	28	28	129	26	26
10	3	3	50	3	6	90	23	23	130	28	28
11	2	2	51	3	3	91	(3) 23	3	131	28	11
12	18	18	52	3	3	92	28	28	132	11	11
13	15	15	53	3	3	93	28	11	133	30	24
14	(1) 14	1	54	3	3	94	(3) 9	3	134	11	11
15	1	1	55	4	3	95	28	11	135	11	11
16	4	4	56	4	4	96	3	0	136	11	11
17	3	3	57	(6) 3	6	97	31	11	137	11	11
18	3	3	58	6	6	98	10	10	138	28	28
19	18	18	59	3	6	99	31	11	139	28	11
20	15	15	60	3	3	100	22	12			
21	19	19	61	(3) 6	3	101	24	14			
22	6	6	62	3	3	102	22	22			
23	18	18	63	4	4	103	24	24			
24	2	2	64	6	6	104	7	27			
25	(14) 1	1	65	7	23	105	27	27			
26	(6) 19	6	66	23	23	106	27	7			
27	1	1	67	6	6	107	28	28			
28	3	3	68	9	9	108	28	28			
29	(14) 1	1	69	(3) 19	3	109	(9) 8	9			
30	3	3	70	3	6	110	22	10			
31	3	3	71	23	23	111	24	24			
32	4	4	72	(3) 23	3	112	24	24			
33	3	3	73	3	6	113	(22) 30	10			
34	6	6	74	(3) 6	3	114	25	25			
35	(6) 3	6	75	3	3	115	25	25			
36	6	6	76	(3) 22	3	116	25	23			
37	6	6	77	3	3	117	25	26			
38	3	3	78	(3) 22	3	118	25	25			
39	3	3	79	4	4	119	26	25			
40	19	19	80	22	22	120	29	28			

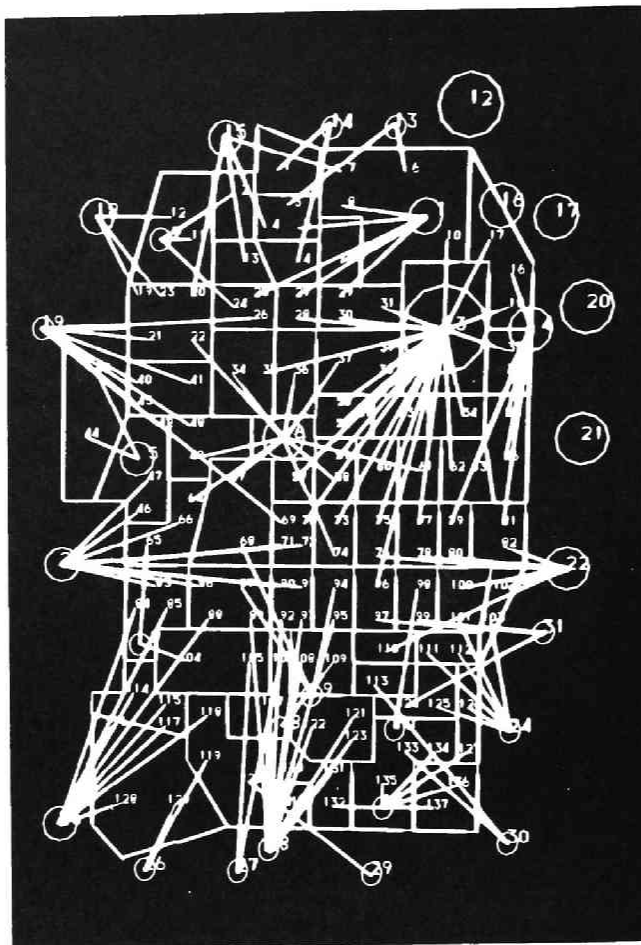
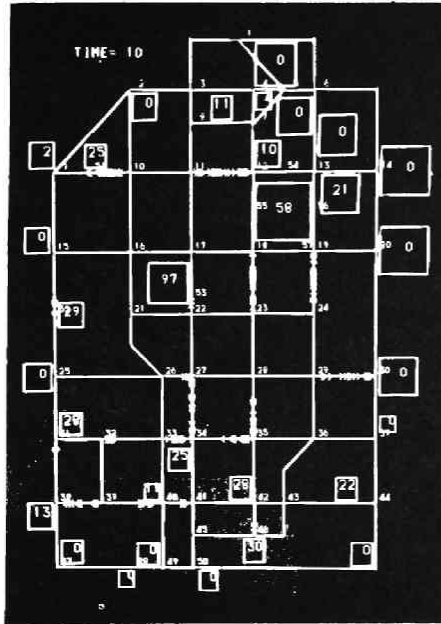


図 2-20. 昼間 O-D 図 (最適解)

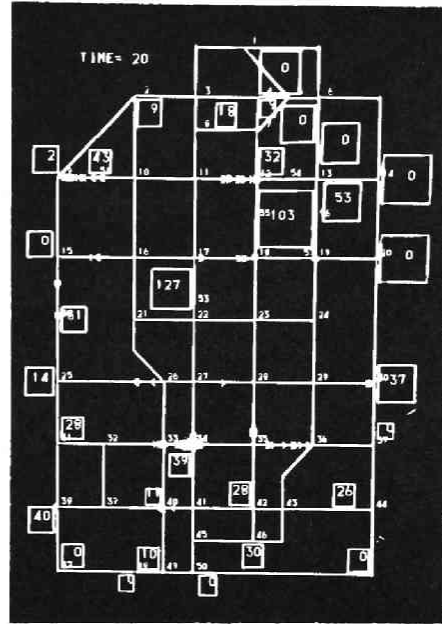
## 5. アウトプットのグラフィック化

前項で示した O-D 図も含めて、このシミュレーションのアウトプットはすべて CRT 上にディスプレイすることができ、避難状況の時間的な変化を連続して見る事が可能である。参考までに、昼間の避難の STEP1 と最終的な解 (STEP3-4) について、10 分ごとの避難状態を図 2-21 と図 2-22 に示しておく。なおトランザクションは、ネットワーク上の矢印 (1 本が 500 人) で示されており、その向きが移動方向である。またスペースは各位置に正方形で表示されており、中に到着を完了した人員を 500 人単位で示している。左上に示した時間は経過時間で、単位は (分) である。これによると STEP1 では、リンク (33-34) で激しい混雑が発生しており、それは STEP3-4 で避難が完了してしまっている時刻 (39 分) でも、いまだ持続していることがわかる。

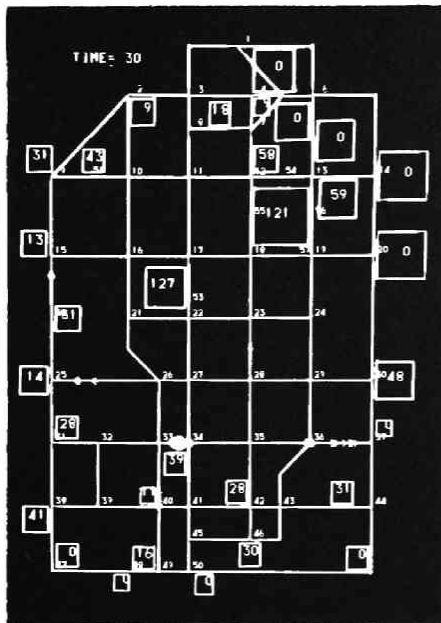
10 分



20 分



30 分



40 分

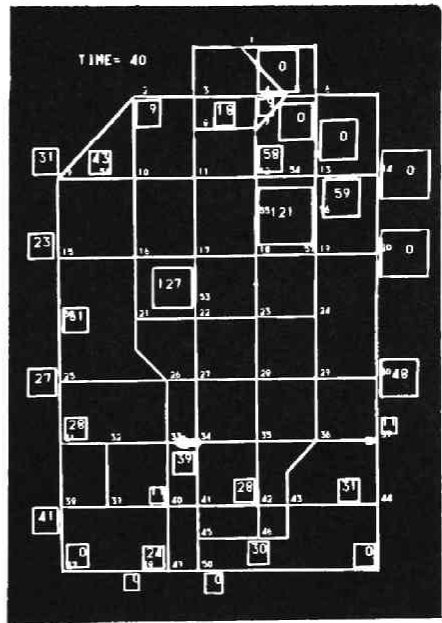
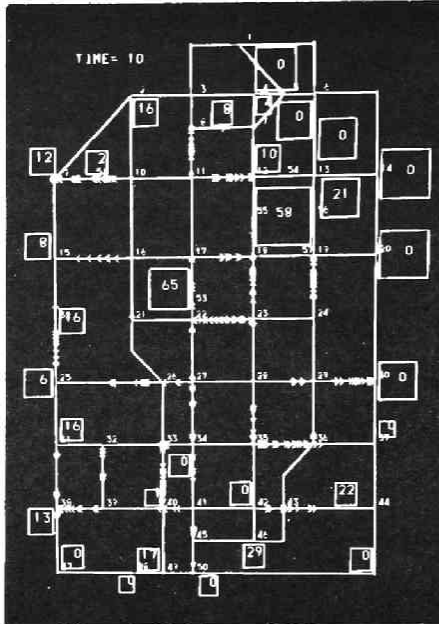


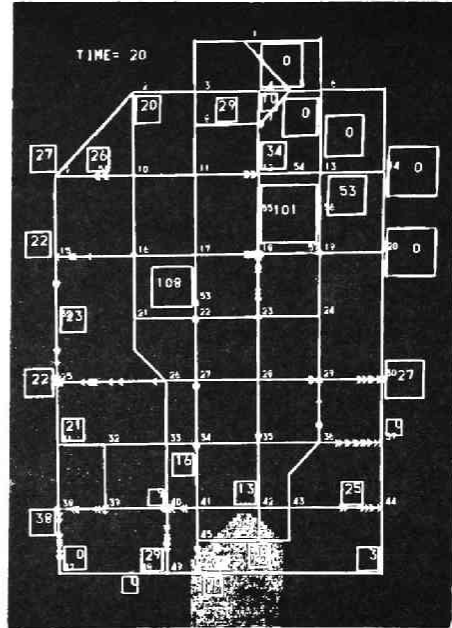
図 2-21. STEP1 昼間避難状況



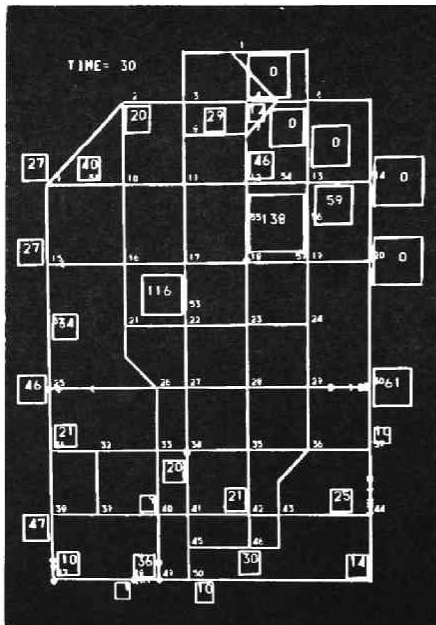
10 分



20 分



30 分



40 分

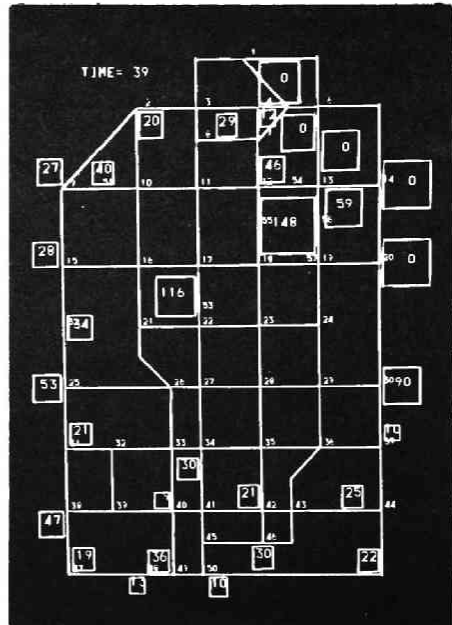


図 2-22. STEP3 (最適解) 昼間避難状況

## 6. ま と め

この研究は、避難完了時間が最小となるような避難計画を求めることを目的としたものであるが、3-3で説明した最適避難計画モデルから得られる最終解は、数学的にその最適性を保証しているわけではないので、最適解というよりは、むしろある一つの初期条件から出発して求められた一つの収束解といった方が妥当であろう。しかし、ゾーン別の人口の変化や避難地の収容制限、及び道路での混雑状況など、現実存在する種々の制約条件を前提とした上で、ある解決策を求めなければならないこの種の問題においては、ここで作成したようなシミュレーションモデルを用いる方法はきわめて有効であり、数学的に説明不足の点を、充分補うものと考ええる。

次に、ここで示した広域避難計画も京都市を対象としたものであるが、最終案として京都市防災会議に提出した資料<sup>11)</sup>は、これを多少修正したものである。その概容は付録の3に示してあるが、主な変更点を述べておくと、最終案では、全体の避難完了時間に多少の増加があっても、住民の心理的な意向の方を優先しており、避難地に隣接する地区の人々は無条件にそこへ避難することを許している。また、ここでの計画では、一次避難地に面積1ha以上の空地31ヶ所をプロットしたが、最終案では避難地に、輻射熱からも安全で、人々が一定期間滞在できる場所を考えたので、面積20ha以上の空地6ヶ所に限定している。

最後に、広域避難計画の、都市防災計画（システム）全体での位置づけについて述べると、広域避難は、ある地区をとった場合、その内部では避難地の絶対量が不足しているため、防災システムとして自己完結できないことから、さらに領域を広げ、その中で新たな再配分を行って全体の安全を確保しようとするものである。従って都市の防災計画の最終的な方向としては、できるだけ小さな領域で計画が完結できるような対策、すなわち、「建物の不燃化や防火帯の造成などにより、他の地区からの延焼がなく、しかも内部に避難地があり、その地区の住民を安全に収容できる」という恒久的な対策を念頭におき、広域的な避難計画が、地区の防災計画に対して予備的、並列的な関係になるように心がけるべきであろう。

なお、広域避難計画において、避難路の安全確保は不可欠の条件であり、もし避難路が通行不能になるような事態が発生した場合にも対処できるようにするため、「オンライン方式」による情報の集収、伝達を行って、即刻他の経路（迂回路）を指示、伝達できるような組織の確立が必要となろう。本論文では、これに関連する研究として「リアルタイムシステムによる最短経路選択モデル」を付録の4で紹介している。

参考文献・資料

- 1) 「京都市の町別人口」 京都市統計センター 昭和48年
- 2) 「京都市の事業所」 京都市統計センター 昭和48年
- 3) 「全国道路交通情勢調査」 京都市開発局 昭和46年
- 4) 「建築設計資料集成 1」 日本建築学会編
- 5) 堀内三郎「大震災時における広域避難広場の選定について」 京都市 昭和48年6月
- 6) 宗本順三, 小林正美, 加納修平「梅田ターミナルにおける群集流動シミュレーション, その1~3」 日本建築学会近畿支部研究報告集 昭和47年6月
- 7) 宗本順三, 小林正美, 加納修平, 中井 進「梅田ターミナルにおける群集流動シミュレーション, その4,5」 日本建築学会近畿支部研究報告集 昭和48年6月
- 8) 杉恵頼寧「交通量の需要推計におけるネットワークシミュレーションの方法論的研究」 都市計画 66号 昭和47年
- 9) 堀内三郎, 小林正美, 中井 進「広域避難計画に関する研究」 都市計画, 別冊(8) 学術研究発表会論文集 昭和48年11月
- 10) 中井 進「都市域における避難計画」 京都大学修士論文 昭和49年3月
- 11) 堀内三郎「京都市における大震火災時の避難計画の研究, 一最適避難経路の選定と所要避難時間一」 京都市防災会議 昭和49年6月
- 12) 堀内三郎, 小林正美, 中井 進「都市域における避難計画の研究」 日本建築学会論文報告集 第223号 昭和49年9月
- 13) 堀内三郎, 小林正美, 中井 進「都市域における避難計画の研究, その1,2」 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和49年10月

## 第3章 京都市三条地区の安全度評価シミュレーション

### 1. 概 説

この研究はケーススタディとして京都市の三条地区をとりあげ、そこを対象とした防災計画により、人々の安全がどの程度確保されるかを、シミュレーションにより求めてみたものである。

防災システムのシミュレーションモデルについては、既に、第1部の第2章で詳しく説明してあるが、これはその具体的な応用ではなく、むしろ第1部のモデルは、ここで行ったシミュレーションの結果を考察することにより、人々の安全の決定に大きな役割を演じている要因のみをとりだして、より一般的なシミュレーションモデルとして作成したものである。

すなわちこのシミュレーションでは、火災の延焼や人々の避難に関係する要因をできるだけ多くとりいれており、延焼を扱う浜田式については、それを忠実に再現することにして、風向、及び延焼速度や延焼限界距離の経過時間による増加も、モデルに組み入れた。また、対象地域の木造、及び不燃造建築物の建築面積を、100m角のメッシュ単位で算出しており、これが延焼、及び避難の際の基本単位となっていることも、第1部のモデルとの相違点である。

### 2. 対象地域

#### 2-1 領域の設定

対象地域には、京都市の三条地区をあらわす1/2500の地図（地図名、三条大橋）に含まれる部分を用いており（図3-1）、そこは100m角のメッシュ300個からなる広さ1,500m×2,000mの地域である。火災の延焼のシミュレーションにはこの全域を用いたが、避難を行い、安全度評価シミュレーションの対象としたのは、その中の700m×800mの地区56メッシュ（図3-1のA）である。そこは外周が、御池、烏丸、四条、河原町、といういずれも幅員が20m以上の道路で囲まれており、地区内からその道路まで避難できれば、一次的な安全は確保されるものとした。以下、この章では300メッシュからなる地域を「全体」、安全度評価の対象とした56メッシュを「地区」と呼ぶことにする。

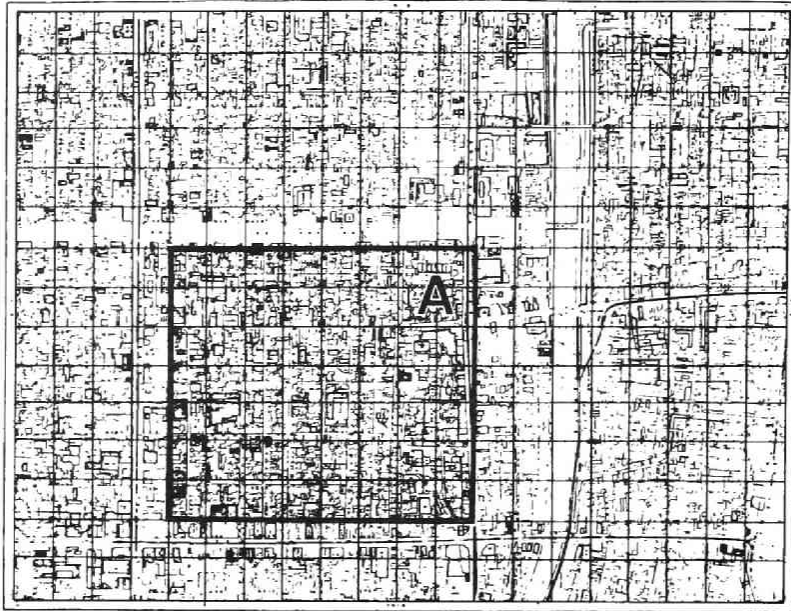


図3-1. 対象地域

## 2-2 地域の構造分類

都市的規模の延焼を扱うためと、地域の構造的な性格を表わすために、対象領域を100m角のメッシュに分割した。各メッシュには、地図上から実測した道路、河川率、及びこれらを含んだ空地率と、木造建ぺい率、不燃造建ぺい率の各値が原データとして与えられており、それをさらに図3-2の分類パターンに従って、空地、木造、不燃造の3種類に再分類した。なお

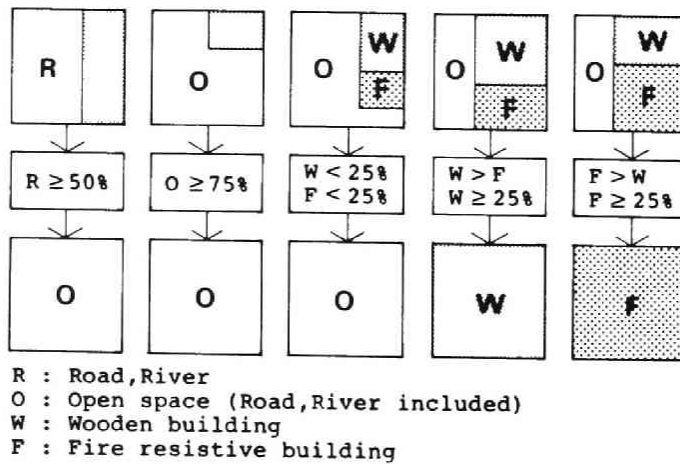


図3-2. 構造分類パターン

図3-2で、Rは道路、河川率、Oは空地率を示し、Wは木造、Fは不燃造の建ぺい率を表わしている。

ここで延焼対象となるのは、木造に割付けられたメッシュであり、それにはさらに家屋長 $a(m)$ と隣棟間隔 $d(m)$ が、次式により与えられている。なお防火木造は木造とみなし、木造はすべて平屋建に仮定した。

$$a = N(m, \sigma) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$d = a \cdot (1/\sqrt{\delta} - 1) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここにNは正規分布で、平均 $m=8m$ 、標準偏差 $\sigma=1m$ で変動させた。また、 $\delta$ は建ぺい率で、次式により求められる。

$$\delta = \frac{\text{木造} + \text{不燃造建築面積}}{\text{メッシュ面積}(1ha) - \text{道路、河川面積}} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

すなわち木造メッシュでは、一辺 $a$ の正方形に近似された家屋が、 $d$ の等間隔で並んでいると仮定していることになる。

対象地域では、不燃建築物、及び空地が図3-3、3-4のように分布しており、これを図3-2のパターンに従って分類したところ、図3-5のような結果になった。

なお、評価地区(56メッシュ)の隣棟間隔は、(3.2)式を用いて計算した結果、平均 $1.4m$ となった。

## 2-3 気象条件

過去のデータによると、平常時の出火では、火気の使用率が高いためか、冬季に発生する火災の件数が最も多くなっている(表3-1)。従って、ここでも冬季に地震が発生した場合を考えることにし、その時の風向、風速は、京都地方気象台の調べによる、昭和40～50年の12、1、2の各月における10分間の平均風速の最大値とその時の風向のデータ、33個をもとに決定することにした。

これらの頻度分布は図3-6、3-7のようになり、風速は平均 $9.2m/sec$ 、風向については北西が最も多かったのでこれを代表値にした。

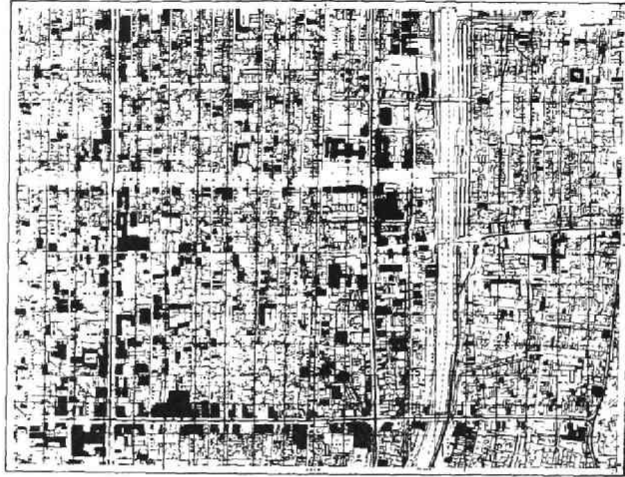


図 3-3. 不燃建築物分布

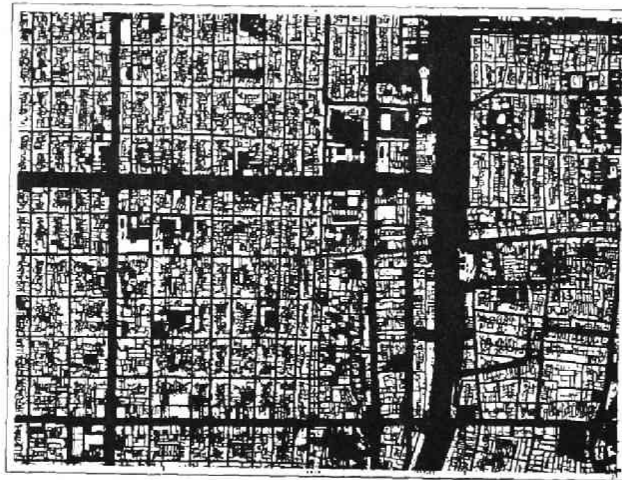


図 3-4. 空地分布

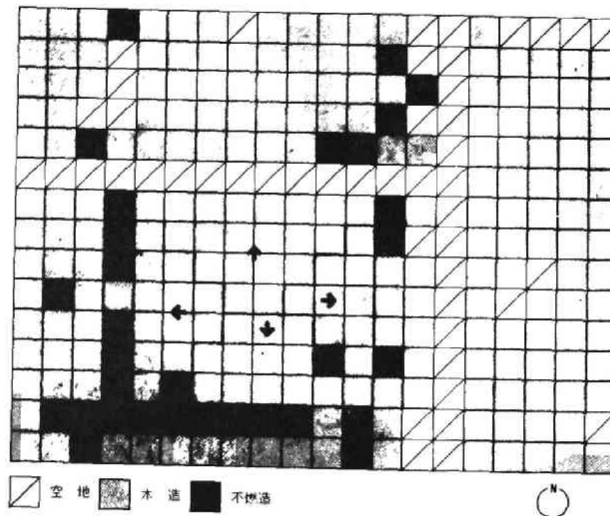


図 3-5. 対象地区の構造分類

表 3-1. 季別・平常時建物火災の出火件数及び比率（5ヶ年平均）\*1

区 別 季 別	1ヶ月当り平均 出 火 件 数	比 率	
		通年平均を1とした場合	夏季を1とした場合
春 季（4～6月）	14.8 件	0.77	1.13
夏 季（7～9月）	13.1	0.69	1.00
秋 季（10～11月）	20.0	1.05	1.53
冬 季（12～3月）	26.5	1.39	2.02
通 年（1～12月）	19.1	1.00	1.46

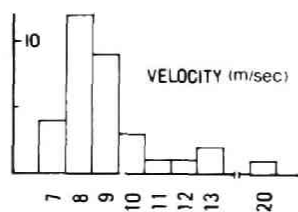


図 3-6. 風 速

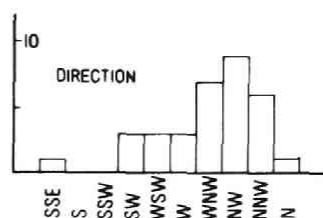


図 3-7. 風 向

## 2-4 出火件数の推定

対象地域内の出火件数の推定は、文献 1) をもとにして作成された京都市消防局による報告書「京都地震の被害想定」（文献 2)）に用いられている方法(I)と、文献 3) に示されている算出方法の両者を併用することにした<sup>4)</sup>。これらの予測方法は、既に第 1 部第 2 章の 1、出火モデルの項でその概略を説明してあるが、(I)の方法は、関東大震災時の出火率（件数/戸数）を、平常時の出火率の時間、及び都市相互間の変化で補正して、現在の京都に適用するものであり、(II)の方法は、関東大震災も含めた過去 12 の地震における全壊率と出火率（件数/世帯数）の関係を、指数関数で回帰したものである。

(I)による値として、京都市で関東大震災クラスの地震（東京における震度 6）が夏季の昼食時に発生すると、その出火率は  $0.017 \times 10^{-2}$ （件/戸数）になることが文献 2) で求められている。また(II)の方法による値としては、同じく文献 2) において、マグニチュード 6.5 程度の地震が発生した場合に、京都市全体での倒壊率（倒壊戸数/全戸数）が約 3%（8,000/263,582、但し倒壊戸数には非木造も含む）になる結果が得られており、これを文献 3) の研究にもとづく両対数グラフ（図 3-8）にあてはめると、通年全日の出火率として  $0.097 \times 10^{-2}$ （件/世帯）が得られる。

\*1 京都市における昭和 44 年より同 48 年に至る 5 ヶ年間の月別建物火災件数、文献 4) より引用



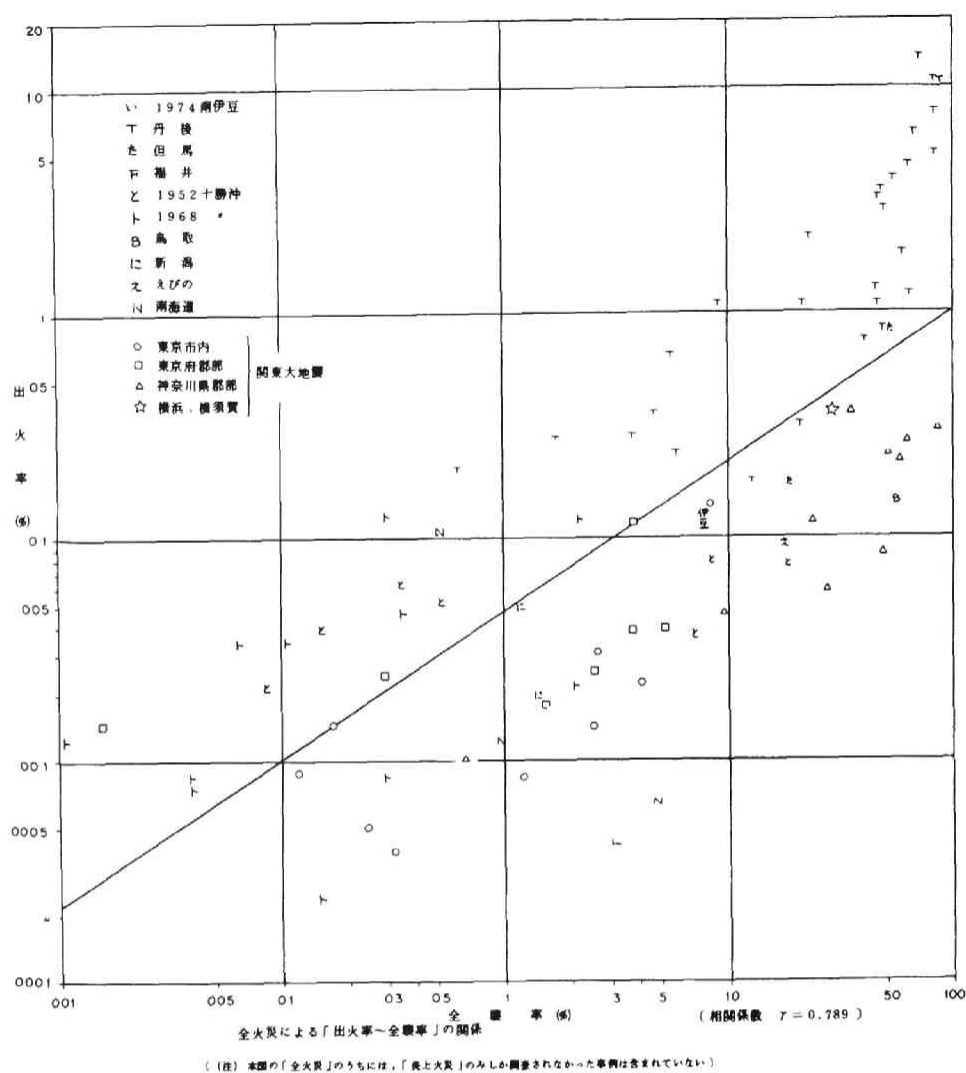


図 3-8. 「出火率～全壊率」の関係 (文献 4) より引用)

次に、これらの出火率の、地震発生時刻とした冬季夕食時への補正は、平常時の火災発生  
の季別(表 3-1)、及び時間帯別比率(表 3-2)を用いて行っており、その結果は表 3-3 の  
ようになる。すなわちここでは戸数=世帯数とみなして、(I)による出火率を下限値、(II)による  
値を上限值とし、この間に入る値を出火件数として用いることにした。

一方、市民消火率については、文献 2) で求められている平均値  $\alpha = 0.54$  をそのまま採用す  
ることにしたが、これは昭和 40 年から 42 年までの京都市の総建物火災件数 1,053 のうち、市  
民によって消火された 568 件の実績値から求められたものである。

表 3-2. 時間帯別・平常時建物火災の出火件数及び比率(5ヶ年平均)\*

区 別 時間帯	年 間 平 均 出 火 件 数	比 率	
		全日平均を1とした場合	昼を1とした場合
朝 (7~8時)	4.4	0.46	0.33
昼 (11~13時)	13.4	1.41	1.00
夕 (17~18時)	14.8	1.56	1.10
全 日 平 均	9.5	1.00	0.71

\* 京都市における昭和44年より同48年に至る5ヶ年間の「時間帯別建物火災出火件数」, 文献4)より引用

表 3-3. 京都における M=6.5 の地震時の出火率(件/世帯)

区 別 時刻	下 限 値 $\times 10^{-2}$	平 均 値 $\times 10^{-2}$	上 限 値 $\times 10^{-2}$
通年・全 日	0.018	0.058	0.097
夏季・昼食時	0.017	0.056	0.094
冬季・夕食時	0.039	0.126	0.210

以上は、京都市全体を対象とした場合の平均値であるが、次にこれらを今回対象とした地域に適用する際には、さらに文献2)で行われている、出火危険と市民消火力に関する地区の5段階評価に対応させて補正することにした。この評価は、出火に関しては、過去の設備器具を発火源とした出火件数、重要危険対象物数、戸数及び採用倒壊率を考慮して行われたものであり、評価値のウェイトづけは表3-4のようになっている。従って、ここでは評価値3の「普通」の項目に表3-3の冬季夕食時の値を対応させて、他の評価値の出火率を求めた。一方、市民消火力は、消火器設置数、消防団員数、及び震度を考慮して評価されているものであるが、同じく「普通」の項目に平均値  $\alpha = 0.54$  を対応させて、他の値を求めた(表3-5)。

表 3-4. 5段階評価による出火率

出火評価値		1	2	3	4	5
項目						
火災危険の大小		—	やや小	普通	やや大	大
係数(ウェイト)		—	1.0	2.0	2.8	3.3
出火率 $\times 10^{-2}$	下 限	—	0.020	0.039	0.055	0.064
	平 均	—	0.063	0.126	0.176	0.208
	上 限	—	0.105	0.210	0.294	0.347

表 3-5. 5段階評価による消火率

項目 \ 市民消火 評価値	1	2	3	4	5
市民消火率の大小	小	やや小	普通	やや大	大
係数(ウェイト)	1.0	1.15	1.32	1.54	1.66
市民消火率	0.41	0.47	0.54	0.63	0.68

このようにして求めた出火率、市民消火率に、対応する区分(図3-9)の世帯数を乗じて得られた出火、及び炎上件数を、表3-6(全体)、表3-7(地区)に示す。

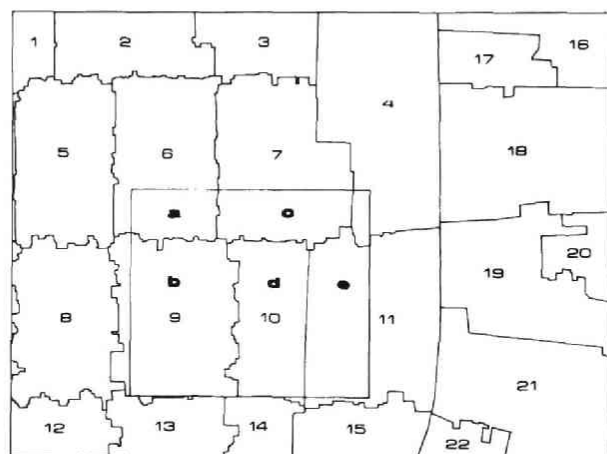


図3-9. 元学区による分割

表 3-6. 「全体」の予想出火件数

出火 評価値	消火 評価値	対応地区	世帯数	出火件数			炎上件数		
				下限	平均	上限	下限	平均	上限
3	4	1, 2, 3, 5 6, 8, 9, 12 13, 14	4428	1.73	5.58	9.30	0.64	2.06	3.44
3	3	16, 17, 18	2948	1.15	3.71	6.19	0.53	1.71	2.85
3	5	19, 20 21, 22	3348	1.31	4.22	7.03	0.42	1.35	2.25
4	3	4, 7, 10 11, 15	3314	1.82	5.83	9.74	0.84	2.68	4.48
計 Σ			14038	6.01	19.34	32.26	2.43	7.80	13.02

表 3-7. 「地区」の予想出火件数

出火 評価値	消火 評価値	対応地区	世帯数	出火件数			炎上件数		
				下 限	平 均	上 限	下 限	平 均	上 限
3	4	a, b	899	0.35	1.13	1.89	0.13	0.42	0.70
4	3	c, d, e	1293	0.71	2.28	3.80	0.33	1.05	1.75
計 Ⅱ			2192	1.06	3.41	5.69	0.46	1.47	2.45

従って、「全体」と「地区」の対応は、表 3-8 のようになり、ここでは 300 メッシュでの炎上件数に、3（下限）～8（平均）～13（上限）の値を採用し、市民消火が行われない時の出火件数には、最大 35 件までを考えることにした。また、地区（56 メッシュ）の炎上件数は 1.5 程度で、全体に対する比率が  $1.47/7.80 =$

表 3-8. 「全体」と「地区」の対応

	下 限	平 均	上 限
出火率（冬・夕） （単位、件/世帯）	$3.9 \times 10^{-4}$	$12.6 \times 10^{-4}$	$21.0 \times 10^{-4}$
出火件数	6.0 (1.1)	19.3 (3.4)	32.3 (5.7)
炎上件数	2.4 (0.5)	7.8 (1.5)	13.0 (2.5)

（ ）は評価地区 56 メッシュの値

0.188 となることから、全体の炎上件数  $N$  に対して  $N/5$  程度が、評価対象地区で発生する火災となる。

### 3. 延焼モデル

延焼モデルは、浜田博士により求められた延焼速度式<sup>5)</sup>を基本にして作成したものである。第 1 部第 2 章で述べた延焼モデルと同様に、ここでも消防力による消火は、地震時には交通障害などから不確定な要素になるとして、モデルには組み込まなかった。しかし前項で述べたように、市民消火による効果は、市民消火率  $\alpha$  として求めており、炎上火災件数の減少におきかえている。

#### 3-1 延焼現象のモデル化

##### (1) 出火地点

炎上火災の出火地点には、対象地区内のメッシュを無作為に選んで決定しており、そこが木造の場合は出火、空地の場合は再びプロットをやり直し、不燃造の場合は出火しても延焼せずとして、木造メッシュの出火のみにより延焼をシミュレートした。従って、不燃建築物の増加

による「延焼防止」の効果は、延焼火災件数の減少で表わされることになり、出火件数＞炎上件数＞延焼件数の関係になっている。

## (2) 延焼過程

このモデルでは8方向の延焼を扱っており、そのうち風上、風下、風側の4方向の延焼時間、及び延焼限界距離は浜田式をそのまま用いた。<sup>\*1</sup> 残りの4方向については、延焼が卵形に広がるという堀内博士の研究<sup>6)</sup>結果を用いて、図3-10に示すような楕円近似を行った。なお浜田式によると、風下方向の延焼速度と延焼限界距離は時間経過と共に増加することになっているので、本モデルもこれに従った。<sup>\*2</sup>

一つのメッシュには50m間隔に9つのポイントを設定しており、その着火状態で延焼を表現した。この場合、出火ポイントが決まれば、その位置関係と延焼速度から周囲のポイントの着火時刻を求めることができ、同時に数ヶ所からの出火となる

ときでも、一つのポイントに各方向から与えられる着火時刻のうちで、最小となるものを持つように修正を繰返していけば、同時にすべてのポイントの着火時刻を計算することができる。しかし、ここでは時間経過による延焼速度や延焼限界距離の増加を考慮し、さらに風向や風速の時間変化も取り入れられるようにしたため、毎時、延焼速度を計算し直すことにした。そのため、ある時刻に他のポイントに着火時刻を与える操作を行わせたのは、その時刻に着火となるポイントに限定しており、与える対象も図3-11の位置関係にあるポイントに限った。しかし、一つのメッシュの1～8までのポイントは、同時に、隣接するメッシュのポイントにもなっているので、そこが着火となった場合には、図3-12で破線で結んだポイントも着火となることから、それらは同じく図3-11のパターンに従って、自分の属するメッシュの他のポイントに、着火時刻を与えている。なお、出火メッシュの出火点は中央のポイントとしており、空地や不燃造メッシュ、及び全ポイントが着火して延焼済となったメッシュは、時間付与の対象

$$V_{ds} = \sqrt{2 / (1/V_d^2 + 1/V_s^2)}$$

$$V_{us} = \sqrt{2 / (1/V_u^2 + 1/V_s^2)}$$

$V_{ds}$  : 風下45°延焼速度

$V_{us}$  : 風上45°延焼速度

$V_d$  : 風下延焼速度

$V_u$  : 風上延焼速度

$V_s$  : 風側延焼速度

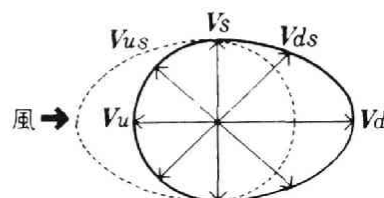


図3-10.

\*1, \*2 いずれも付録1「浜田式について」を参照のこと。

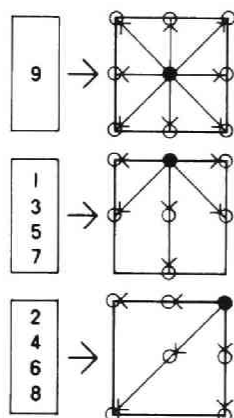


図 3-11.

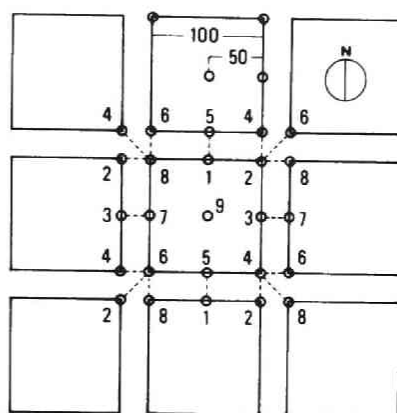


図 3-12.

から外している。また平均延焼時間は延焼対象となる木造メッシュに属するポイントの、平均着火時間で求めている。

### 3-2 アウトプット

ここでは、この延焼モデルから得られるアウトプットについて説明する。

図 3-13 は、北西の風、10m/secの時に、21ヶ所から同時に出火となった場合の延焼動態を

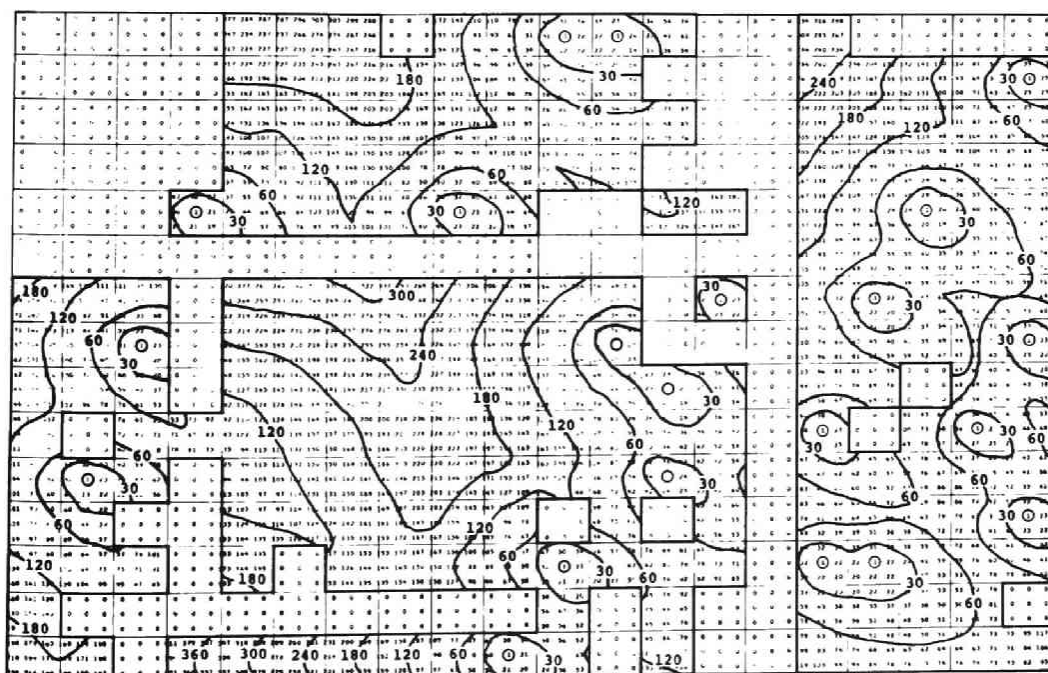


図 3-13. 等時曲線図 (単位, 分)

条件: 北西の風 10 m/sec, 21地点出火

表わす等時曲線図である。なおこのシミュレーション例では、出火件数の決定を、いずれも300個のメッシュの中から任意にN個を選び出し、そこが木造の場合のみ出火として、空地の場合に再度プロットしなおすことは行っていない。図3-13では、30ヶ所をプロットした結果、21ヶ所からの出火となり、411分後に延焼終了となった。

次に、この状態から、風向、風速、プロット数を変化させたときの延焼終了時間は、表3-9のようになり、風向でいえば、北東の風の時の延焼が最も速くなるなどの地区の性格がわかる。

表3-9. 延焼終了時間

風 向	終了時間 (分)	風 速 (m/分)	終了時間 (分)	プロット ト数	出 火 地点数	終了時間 (分)
N	363	5	517	10	7	598
NE	330	10	411	20	14	510
E	350	15	316	30	21	411
SE	380	20	243	40	29	411
S	363			50	35	281
SW	411			60	39	281
W	453					
NW	411					
風速, 10m/sec 出火点数, 21		風向, NW 出火点数, 21		風速, 10m/sec 風向, NW		

この延焼状態の時間変化は、CRTを用いたグラフィック化により連続して見ることができ、その場合には、各時刻に延焼したポイントが、50m角の正方形で順次地図に表示されていく。

表3-9のシミュレーションに

ついて、このCRTを用いた表示

例を次に示すが、いずれも図3-

14に示す21ヶ所からの出火を

初期状態としており、図3-15

が北西の風10m/sec、図3-16

が北東の風10m/sec、図3-17

は北西の風で、風速を20m/sec

としたときの、100分までの延

焼状態である。

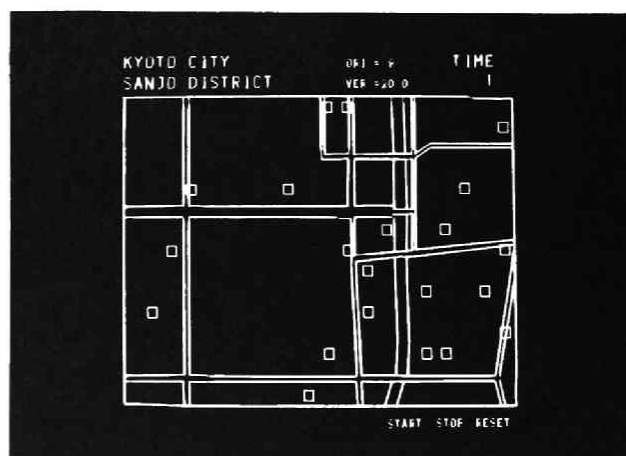
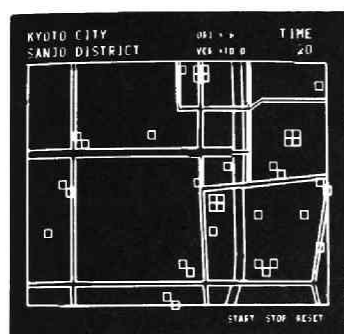
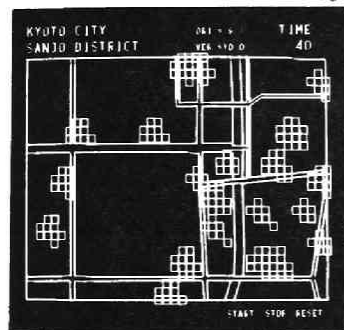


図3-14. 出火状態

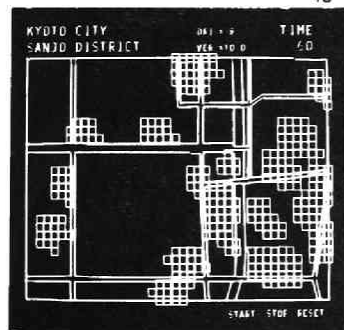
NW 10m/sec



20



40



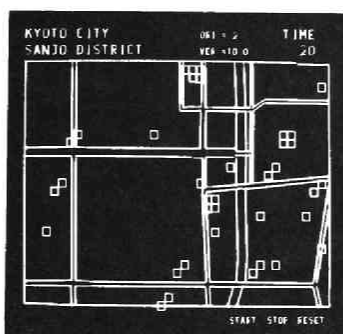
60



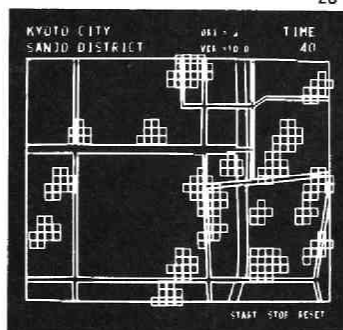
100

図 3-15.  
北西の風 10m/sec

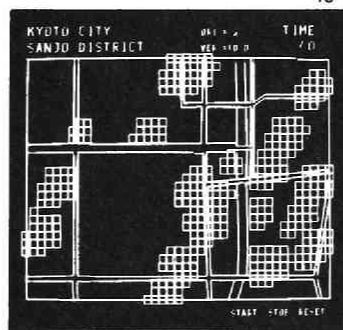
NE 10m/sec



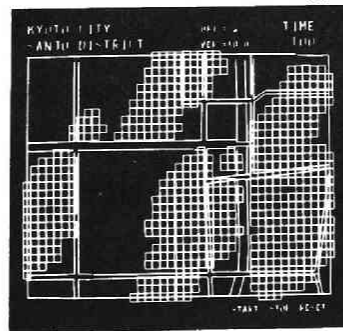
20



40



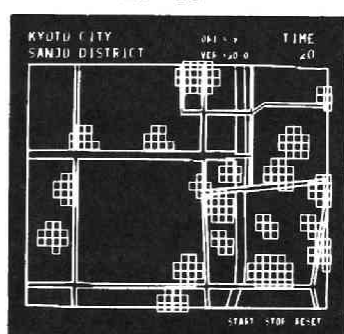
60



100

図 3-16.  
北東の風 10m/sec

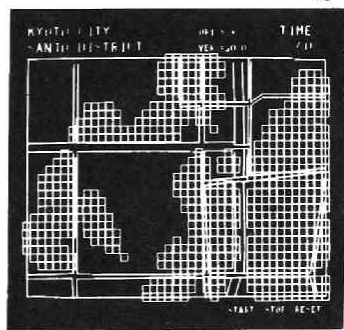
NW 20m/sec



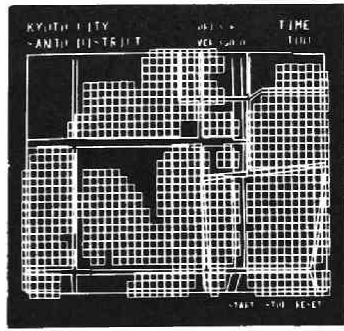
20



40



60



100

図 3-17.  
北西の風 20m/sec



## 4. 安全度評価モデル

### 4-1 避難モデル

ここで扱う避難は、対象地区内からその外周に位置する広域避難路に到達するまでの状態で、そこに至ればあと広域避難地まで、人々は安全に行けるものとした。避難はメッシュ単位で行っており、出火から避難完了までの避難時間を指令時間、伝達時間、準備時間、移動時間の4つに分割し、このうち避難指令の発令には、各メッシュとも同一の時間を与えたが、その情報の伝達及び避難準備に要する時間  $T_1$ ,  $T_2$  は、平均を  $m$  分、標準偏差を  $\sigma$  分として、それぞれ  $T_1 = N(m=5, \sigma=2)$ ,  $T_2 = N(m=10, \sigma=3)$  の正規分布で変動させた。また避難経路には、広域避難路に向けて最短なものをあらかじめメッシュに与えており、移動速度は  $50\text{m/分}$  の一定値とした。従って1メッシュの移動に2分を要することから、途中に通過するメッシュ数を  $n$  として、移動時間は  $(n+1) \cdot 2$  分で与えられる。安全度の評価対象とした56メッシュの地区では、図3-18のような発散型の避難を考えたことから、各メッシュの移動時間の分布は図3-19のようになり、平均値は3.57分となった。

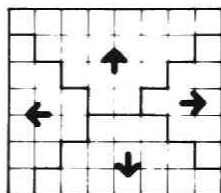


図3-18. 避難方向

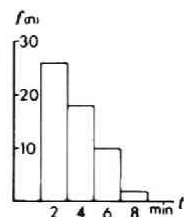


図3-19. 移動時間分布

### 4-2 評価モデル

防災計画の評価は、対象地区で火災が発生して避難が行われた時、結果として何%の人の安全が確保できたかで表わせる。しかし、延焼との関係で人々が死に至る状況を定式化することは難しく、ここでも第1部第2章の評価モデルの場合と同様に、避難途中に人々が火災現場を通過しなければならない状態を「危険」と定義し、その状態に遭遇せず避難できた人数の全体に対する比率で安全度を求めている。これは、延焼と避難の時系列変化の重ね合わせから算定されるが、このシミュレーションでは延焼と避難の基本単位の違いがあるので、避難単位であるメッシュが移動途中に重なった延焼中のポイント数で、この危険状態の計測を行うことにした。すなわち、一つのメッシュには9つのポイントが対応するので、ある時刻のメッシュの中に1個の延焼ポイントがあった場合、その  $1/9$  の者が罹災したと考えることにし、メッシュ  $i$  が広域避難路に至るまでの各時刻に重なった延焼ポイントの累計値を  $k_i$  とした時、そのメッシュの  $k_i/9$  の者が危険な状態に遭遇したとみなした。なお、移動途中に幾度も延焼ポイントと重

なる場合には、その度、メッシュ内の新たな者が出会うものと考え、累計値  $k_i$  が9個になった時点で、そのメッシュは危険度が100%になるものとした。この場合、経路にどのような配置にして3個以上の延焼ポイントがすでにあると、そのメッシュは危険度100%となる。

このカウント方法によると、地区の安全度  $Y$  は、避難メッシュの総数を  $N$  として次の(3.4)式で与えられる。

$$Y = 1 - 1/N \cdot \sum_{i=1}^N k_i / 9, \quad (k_i \leq 9) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

## 5. シミュレーション

### 5-1 代表値によるシミュレーション

ここでは、風向、風速を北西の風 9.2 m/sec とし、炎上件数を全体(300メッシュ)で8件、避難指令を出火後10分に発令した場合に、地区(56メッシュ)の安全度がどの程度になるかを求めてみた。出火地点をランダムに決定するなど、モンテカルロシミュレーションの形式をとっているため、地区の安全度には、100回のシミュレーションの平均値をとることとした。

結果は、安全度  $x$  の頻度分布  $f(x)$  が図3-20のようになり、その統計値には表3-10の値が得られた。

次にこの標本平均  $\bar{x}_1$  をもとにして、正規分布推定の方法により、母平均  $\mu_1$  の区間推定(interval estimation)を行ってみた。標本数を  $n_1$ 、母標準偏差を  $\sigma_1$  としたとき、信頼度95%の母平均  $\mu_1$  の信頼区間(confidence interval)は、式(3.5)で求めることができるが、この場合、標本数が  $n_1 = 100 > 30$  という大標本であることから、 $\sigma_1$  の代りに標本標準偏差  $s_1$  を用いてよく、\*1 各値を代入した結果、(3.6)の区間が得られた。

$$\bar{x}_1 - 1.96 \cdot \frac{\sigma_1}{\sqrt{n_1}} \leq \mu_1 \leq \bar{x}_1 + 1.96 \cdot \frac{\sigma_1}{\sqrt{n_1}} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$95.7 \leq \mu_1 \leq 96.7 \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

すなわち、風向、風速、及び炎上件数に、2.で求めた代表値を用いてシミュレーションを行った場合、地区の安全度が(3.6)の区間に入ることを、95%の確かさで言えることになる。なおこの時、地区の平均延焼火災件数は1.68件で、全体の約1/5( $8 \times 1/5 = 1.6$ )となるこ

---

\*1 文献7) P317 参照

とから、ほぼ妥当な出火状況となっていることがわかる。

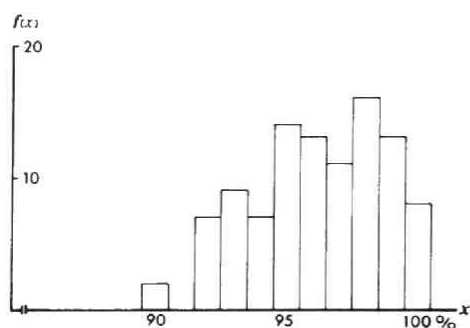


図 3-20. 安全度の分布（代表値）

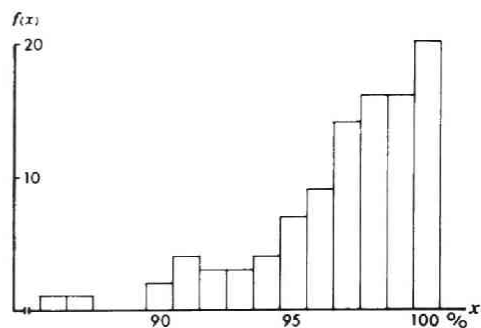


図 3-21. 安全度の分布（変動値）

表 3-10. 統計値（代表値）

	平均値	標準偏差
延焼時間(分)	215.8	114.4
避難時間(分)	27.7	0.002
安全度(%)	96.2	2.49

表 3-11. 統計値（変動値）

	平均値	標準偏差
延焼時間(分)	269.6	211.6
避難時間(分)	27.7	0.002
安全度(%)	96.9	3.04

## 5-2 変動値によるシミュレーション

5-1で一定値とした風速、風向について、ここでは図3-6、及び図3-7に示した分布傾向のままの生起確率でとるようにし、また炎上件数も、表3-8で得られた3件から13件までの値を等確率でとるとした場合のシミュレーションを行ってみた。その他の変数値は5-1の場合と全く同じであり、100回のシミュレーションを繰返した結果、安全度の分布は図3-21のようになり、その統計値には表3-11の値が得られた。

5-1と同様に、安全度について、その母平均  $\mu_2$  の区間推定を行ったところ、95%の信頼区間として(3.7)の値が得られた。

$$96.3 \leq \mu_2 \leq 97.5 \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

次に、5-1の代表値によるシミュレーションとこの変動値のシミュレーションについて、評価地区の安全性を示す各々の母平均  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  の間には差がない、という仮説をたて、有意水準 0.05 の正規分布検定を行ってみた。

① 仮説:  $\mu_1 = \mu_2$

②  $|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| = |96.2 - 96.9| = 0.7$

$$\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} = \sqrt{\frac{2.49^2}{100} + \frac{3.04^2}{100}} = 0.393$$

③ 有意水準  $\alpha = 0.05$  のときの  $z_\alpha$  は、正規分布表より  $z_\alpha = 1.96$

$$④ \quad z_\alpha \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} = 1.96 \times 0.393 = 0.770$$

⑤ 従って、 $|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| < z_\alpha \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$  から仮説採択

すなわち、危険率5%で  $\mu_1 = \mu_2$  が成り立ち、この程度の変動では、出火地点をランダムに決定することによる変動の方が大きいためか、5-1と大差がない結果になるので、代表値を用いるシミュレーションの方法で十分であるといえよう。

## 6. 安全度評価式の検証

第1部第1章で求めた、地区の安全度を求める理論式(1.41)の妥当性については、既に第1部の第2章において確かめられてはいるが、ここでは、京都市の三条地区を対象としたシミュレーション結果からも、同じことがいえるかを調べてみた。

検証には、第1部第2章で行ったのと同様の方法を用いており、<sup>\*1</sup> シミュレーションより直接得られる安全度をYとし、同時に得られる平均延焼時間、及び平均避難時間を、理論式に代入して求められる安全度を推定値Y'と考えて、YとY'の相関係数を求めている。

ここでも、できるだけ広い区間の安全度を用いて検証を行うため、風速には5~30m/secまで、5m/secの間隔で6個の値を用い、炎上件数は全体で5~60件まで、5件間隔で12個のケース、避難指令時間には5~20分まで、5分間隔で4個の値を使用しており、その他のデータには、風向を北西に固定するなど、標準値として設定したものを与えた。従って、 $6 \times 12 \times 4 = 288$  個の組合せとなり、288個の安全度をサンプルにして相関を調べることになる。なお安全度、及び理論式に代入される平均延焼時間は、さらに出火地点の変動も考慮して求められ

---

\*1 第1部第2章の3. 3-1「安全度評価式の検証」を参照のこと。

る平均値なので、一つの入力データの組合せにつき10回のシミュレーションを繰返しており、その算術平均が1ケースの値として与えてある。

結果は図3-22のような分布となり、YとY'の相関係数には $r = 0.915$ が得られ、その回帰直線は(3.8)式のようにになった。

$$Y = 1.94 Y' - 69.58 \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

また、YとY'の適合度を調べるために用いた相関指数には、<sup>\*1</sup>  $\rho = 0.775$ が得られた。

これによると、第1部第2章で得られた結果の方が高い相関を示しているが、一つには、ここでのモデルの方が、用いているメッシュの単位が大きくて、安全度を算定する評価モデルにおいて誤差を生じやすくなっており、シミュレーションとしての精度が劣っていることにもある。しかし、指令時間の変化を同じ4段階にして、風速と炎上件数の変化を5~20m/sec (4

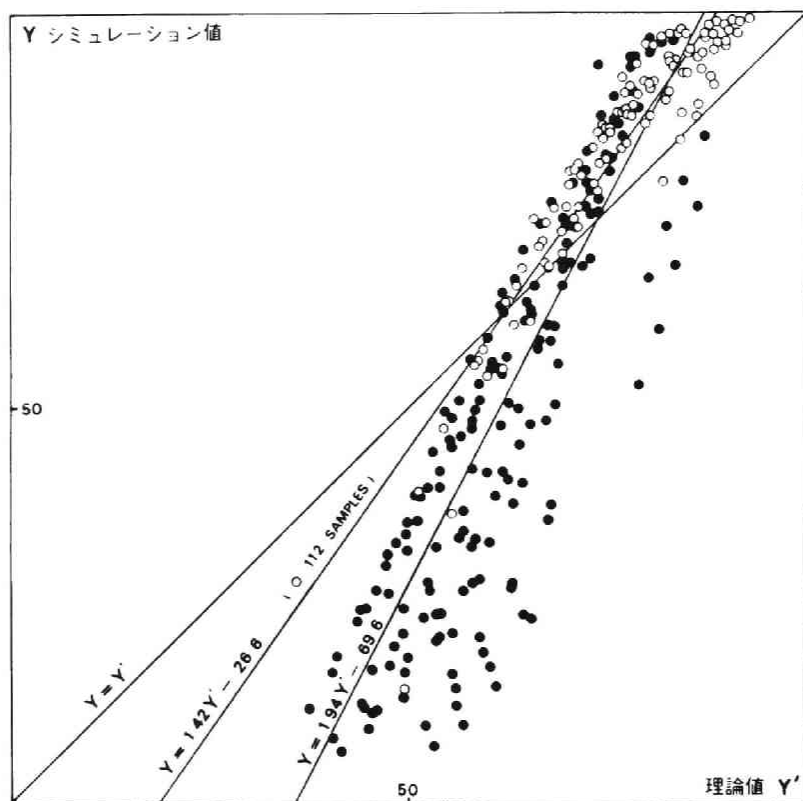


図3-22. シミュレーション値と理論値の相関

\*1 第1部第2章の3. 3-1「安全度評価式の検証」を参照のこと。

段階), 5~35 件(7 段階)におさえ, 全体で 112 個の安全度で同じ解析を行った場合(図 3-22, ○印で表示)には, 相関係数は  $r=0.942$  まで上がり, 回帰直線も(3.9)式のように, 288 個のときより傾きも  $45^\circ$  に近づく結果となり, 相関指数には  $\rho=0.808$  が得られた。

$$Y = 1.42 Y' - 26.56 \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

以上のことから, 実際に問題となる安全度の範囲では, 京都市を対象とした場合でも理論式は有効とみなせ, これを用いて地区の安全性の概算を行ってもさしつかえないといえよう。

## 7. 感度解析

ここでは, 風速, 炎上件数, 避難時間などが, 安全度や平均延焼時間にどのような影響を与えているかについての感度解析を行ってみた。なお風向については, その他の変数の値を一定として, 8 方向につき, 各々 10 個のシミュレーションを行って安全度を求めたところ, 平均値が表 3-12 のようになり, 8 方向の間では, 平均が 95.4 %, 標準偏差が 1.41 % とほとんど差がない。従って, ここで扱ったような広さでその構成形態がほぼ均一な地区では, 風向の違いが安全度に大した影響を与えていなかったもので, 以下の解析ではこれを説明変数から外し, 北西の風に固定して求めた前節 6 の 288 ケースのシミュレーション結果をもとに, 重回帰分析の方法を用いて, 各変数の外的基準に対するウエイトを調べた。

表 3-12. 風 向 の 影 響

風 向	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
安全度	96.2	94.8	95.7	94.7	95.9	95.0	95.4	95.4
備 考	風 速 = 10 m/sec    炎上件数 (全体) = 10 ken    指令時間 = 10 min.							

シミュレーションで用いた各変数の従属関係は図 3-23 のようになっており, 破線で囲んだ部分が今回一定とした変数である。

このうち延焼速度は, 浜田式を用いて計算される値であり, 地区の建ぺい率などの違いが与える影響を調べるために採用した変数である。

各変数と安全度, 及び平均延焼時間との単相関数は表 3-13 のようになり, 重回帰分析の結果には表 3-14 が得られた。なお表 3-14 において, ケース 1~3 は安全度を, ケース 4,

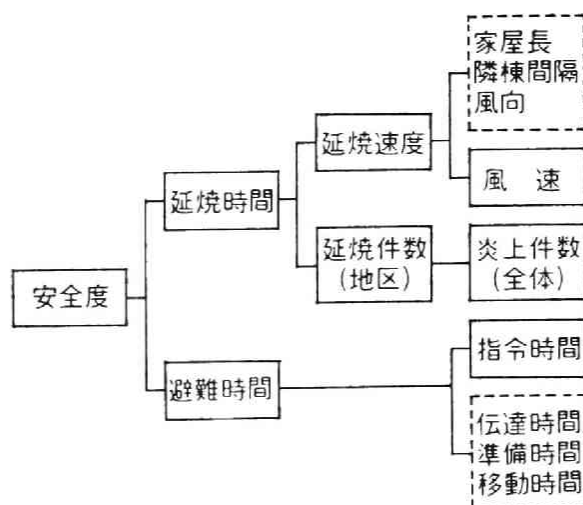


図 3-23. 変数の従属関係

表 3-13. 単相関係数

Y \ X	延焼時間	避難時間	延焼速度	延焼件数 (地区)	風速	炎上件数 (全体)	指令時間
安全度	0.720	-0.259	-0.789	-0.485	-0.796	-0.464	-0.258
延焼時間			-0.567	-0.556	-0.599	-0.545	

表 3-14. 重回帰分析

Y	X case	延焼時間	避難時間	延焼速度	延焼件数 (地区)	風速	炎上件数 (全体)	指令時間	定数項	重相関係数
安全度	1					-2.53 -0.939	-0.73 -0.847	-1.25 -0.663	146.4	0.957
	2		-1.25 -0.662	-4.93 -0.937	-4.09 -0.852				161.8	0.956
	3	0.329 0.745	-1.25 -0.372						72.9	0.765
延焼時間	4					-4.16 -0.715	-1.88 -0.681		217.3	0.810
	5			-7.71 -0.673	-10.34 -0.665				203.5	0.788

上段：偏回帰係数      下段：偏相関係数

5が平均延焼時間をそれぞれ外的基準にした場合であり、上段には偏回帰係数を、下段には偏相関係数を示した。

ケース1,2とも、高い重相関で各変数の影響力を調べることができ、この地区の場合、安全度には風速が一番強い影響を与えている結果となった。<sup>\*1</sup> なおこの解析では、同一地区が対象なのでサンプルした288ケースの間には地域差がなく、従って、風速と延焼速度、炎上件数（全体）と延焼件数（地区）、及び指令時間と避難時間の間では、外的基準に対するウェイトに差がない結果になっている。また、安全度を平均延焼時間、及び平均避難時間の線型重合で回帰したことになるケース3の重相関係数は、 $R=0.765$ で、前節6.「安全度評価式の検証」で求めた相関係数の方がはるかに高くなっており、これからも理論式の方がすぐれた回帰を示していることがわかる。

このうち、指令時間を10分とした場合の、安全度、及び平均延焼時間の変化傾向を図3-24、3-25に示しておく。なお、いずれも延焼件数（地区）を横軸にとり、5～30m/secの各風速についての結果をプロットしたものである。

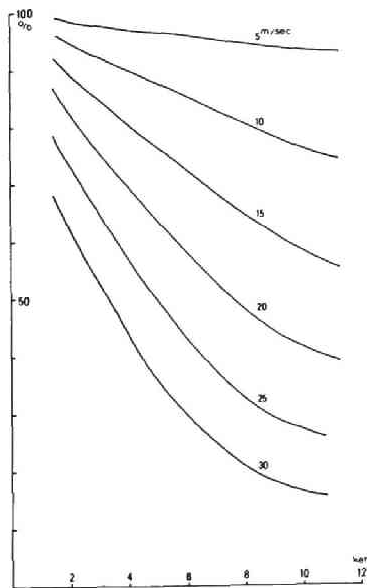


図3-24. 安全度

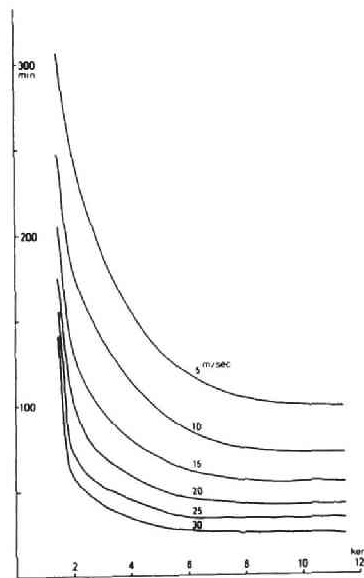


図3-25. 平均延焼時間

<sup>\*1</sup> なおこの順番は、指令時間に伝達、準備時間を加えた避難開始時間が平均20分以上の場合であり、それより前の1～20分の区間では、第1部第2章P32で述べたように避難開始時間の影響度が一番強い結果になっている。



## 8. ま と め

京都市の三条地区を対象として、安全度評価のシミュレーションを行ってみたわけであるが、現在可能な予測方法では、出火件数にかなりの変動があることがわかる。このことについては、地震や火災というものが本来的に確率的な事象であることからしても、その変動を前提として計画を考えることは、むしろ当然であろう。しかし、今回行ったシミュレーションでは、代表値を用いた場合でも、出火地点の任意性をモデルに取り入れておけば、その変動を十分表現できる結果となった。

三条地区の場合、指令に10分、伝達、準備にそれぞれ5分、10分、従って地震発生後、約25分くらいで移動を開始すれば、火災の延焼に対して約95%程度の安全が得られる結果となった。しかしこの地区の場合、外周が広い道路に囲まれていて発散型の避難が出来るなど、木造家屋が多くても、防災計画の対象地区としては恵まれた条件の場所である。

感度解析からは、安全度を決定している主要変数が、延焼速度、延焼件数、避難開始時間の3つに要約される結果が得られた。第1部第2章のシミュレーションモデルは、この結果をもとに作成されており、安全度決定のプロセスがより簡潔に表現されている。

### 参考文献・資料

- 1) 前掲 第1部第2章, 文献1)
- 2)「京都地震の被害想定」 京都市消防局 昭和44年5月, 京都市防災会議資料
- 3) 前掲 第1部第2章, 文献3)
- 4) 堀内三郎「京都市における大地震時の火災による被害状況の予測に関する調査研究」  
京都市防災会議 昭和50年6月
- 5) 前掲 第1部第2章, 文献5)
- 6) 前掲 第1部第2章, 文献4)
- 7) 岸根卓郎「理論・応用 統計学」 養賢堂
- 8) 小林正美「シミュレーションモデルによる都市の防災化の研究」 都市計画 別冊(9)  
学術研究発表会論文集 昭和49年11月
- 9) 堀内三郎, 小林正美「シミュレーションモデルによる火災に対する都市の防災システム研究」 都市計画 別冊(11) 学術研究発表会論文集 昭和51年11月

## お わ り に

この論文は、日本建築学会論文報告集、及び日本都市計画学会学術研究発表会論文集等において、既に発表してきたものをまとめたものであり、結論を要約すると次のようになる。

(1) 地震時に発生する同時多発の火災について、その発生場所を予測することはきわめて難しい問題となる。従って、ここでは① 出火地点の任意性、及び② 緊急時に人間がとりうる単純な行動に基づく避難計画、の2つを前提にした防災計画を考えており、システムとしては、延焼と避難を独立に考えて、延焼防止及び消防力による消火などからなる「延焼遮断」のシステムと、「避難」のシステムが、並列系をなすように扱っている。

(2) このシステム構成により、対象地区の人々が火災の延焼から安全に避難できる確率を、安全度＝平均延焼時間／（平均延焼時間＋平均避難時間）として表わせることが理論的に算出される。さらに、地区の平均延焼時間については、出火地点の任意性から順列・組合せの問題として確率的に推定でき、決定論的に算出される平均避難時間と共に用いて、上記の安全度を解析的に算定することが可能である。従って、この方法を用いて各地区のランク付けを行い、防災対策を行う際の優先順位を決めることができる。

(3) シミュレーション値をもとにした感度解析によると、上記の安全度を決定している主要因が、「火災発生の防止」のシステムで決まる出火件数、「延焼遮断」のシステムから求まる延焼速度、及び「避難」のシステムにおいてきまる避難開始時間の3つであり、このうち特に避難開始時間の影響度が大きいことから、この値の決定が、防災対策の重要なポイントになっている。

(4) 地区の安全度に対して、建物を不燃化していった場合の効果が大きく現われるのは、延焼速度が早くかつ避難が遅れた場合であり、このときさらに防火帯を構成するようにして地域を分割しておく、より大きな安全度が得られ、その効果は同じく組合せの問題として解析的に算定できる。

(5) これらの算定方法に従えば、木造家屋の連続する地域を、路線防火帯により互いに延焼する危険がない700～800m角程度のブロックに分割し、かつその中で延焼拡大する火災を1件程度に押さえた上で、少なくとも出火後20分程度で避難を開始することが、8割方の安全度を確保する場合の目安となろう。

以上は、一次的な避難をもとにした街区レベルの防災計画であり、これには広域的な避難計

画も整っている必要がある。しかし広域避難は、ある地区をとった場合にその内部では避難地の絶対量が不足しているため、防災システムとしては自己完結できず、さらに領域を広げた中で新たな再配分を行って、全体の安全を確保しようというものである。従って、防災計画の最終的な方向としては、路線防火帯に囲まれた地区内にも、その住民を安全に収容できるようなスペースを設け、できるだけ小さな領域で計画が完結するような対策を施して、広域避難が、地区の防災計画に対して予備的、並列的な関係になるように心がけるべきであろう。以上のことをシステムからいえば、こと安全に関するような問題においては、できるだけ小さな領域でシステムを設定し、さらにそのシステムの状態（安全）を決定している変数（延焼、避難）が、外部からの影響が少なくそのシステム内で独立に操作できるようにし、かつその変数間の関係も、個々の目的値の最大化、あるいは最小化が、システム全体としての目的（安全の確保）に直接連がるように設定することが重要である。これは、都市全体の地震防災という複雑で不確定要素の極めて多い問題を、そのまま複雑なシステムとして扱うのではなく、相互に独立な、できるだけ簡単なサブシステムの問題に分割して扱う方が、最終的な全体の目的達成のためには、より適切であるという考えに基づくものである。

なおこの研究では、解析方法の一つとしてシミュレーションを用いているが、ここで扱うような、規模が大きく、人間的要素を多分に含む社会科学的な問題では、シミュレーションしか実験の手立てがないことが多い。その場合、シミュレーションでは現実をなるべく忠実に表現しようとする考えから、複雑なプロセスや確率過程を含むことになり、モデルの構成から直接変数間の関係を求めることは難しくなっている。しかし、多変量解析法などを併用して、シミュレーションから得られるデータに統計的な処理を施せば、要因間の因果関係の推定や、理論的に算出された関数の検証には有効な方法となり、本研究でも、現実の値を推定するというよりは、むしろ問題把握のための方法論として、シミュレーションを用いたものである。

終わりに、この研究をまとめるにあたり終始、御指導と御鞭撻をいただいた京都大学教授 堀内三郎先生、並びに日頃から多くの御教示をいただいている京都大学教授 天野光三先生に心から感謝の意を表する次第である。

## 付 録

1. 浜田式について
2. 出火確率  $P_k(n, r)$  の一覧表
3. 京都市広域避難計画最終案
4. リアルタイムシステムによる最短経路選択モデル



## 付録1 浜田式について

ここでいう浜田式とは、昭和26年6月に故浜田稔博士により「火災の延焼速度について」として、「火災の研究」P35に発表されたものであり、裸木造家屋を対象に、建物の規模、階数、間隔、風速、風向、小火災から大火災への推移、などの条件を考慮して求められた延焼速度である。これは実験等をもとにした経験式であり、風上、風下、風側の各方向の延焼時間は、次式により与えられている（図-1）。ただしこれは1階から1階への延焼の場合である。

このうち風下側の延焼について上式が成立するのは、出火後10分以内、それ以後は飛火による延焼の増大を考慮して、延焼速度 $(a+d)/T$ 、及び延焼限界距離 $D$ を、それぞれ図-2、図-3の倍率に従って増加させている。なお延焼時間 $T$ を求めるための $D$ については、時間経過に関係なく、いつも $D=5+v/2$ である。

ここでは本論文に特に関係のある、風下側延焼速度をとりあげ、その関数としての性格を述べた上で、適用に際しての問題点の考察を行ってみた。

$$\text{風下} \quad T = \frac{3 + (3/8) \cdot a + (d/D) \cdot 8}{1 + 0.1 \cdot v + 0.007 \cdot v^2}$$

$$D = 5 + v/2$$

$$\text{風上} \quad T = \frac{3 + (3/8) \cdot a + (d/D) \cdot 8}{1 + 0.002 \cdot v^2}$$

$$D = 5 + v/5$$

$$\text{風側} \quad T = \frac{3 + (3/8) \cdot a + (d/D) \cdot 8}{1 + 0.005 \cdot v^2}$$

$$D = 5 + v/4$$

$T$  : 延焼時間 (min)

$a$  : 家屋長 (m)

$d$  : 隣棟間隔 (m)

$v$  : 風速 (m/sec)

$D$  : 延焼限界距離 (m)

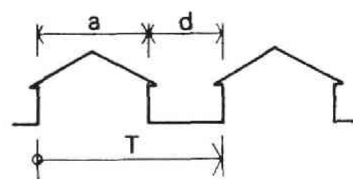


図-1

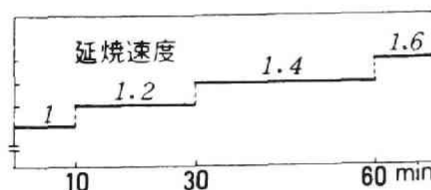


図-2

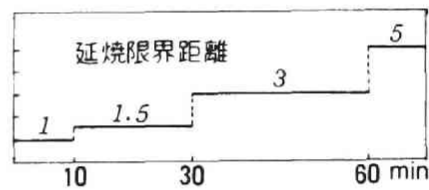


図-3

# A. 浜田式風下側延焼速度

浜田式によると、風下側延焼速度  $V$  (m/分) は、延焼距離  $(a+d)$ m を、延焼時間  $T$  で除すことにより、次の(1)式で求めることができる。

$$V = \frac{a+d}{T} = (1 + 0.1v + 0.007v^2) \cdot \frac{a+d}{3 + \frac{3}{8}a + \frac{16d}{10+v}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $V$  が、実際にどの程度の値をとるのかをみるため、(1)の  $v$  を  $5 \sim 35$  m/sec,  $a$  を  $5 \sim 10$  m,  $d$  を  $1$  m から、風下側延焼限界距離  $D$ , ( $D = 5 + v/2$ ) の最小値  $5$  m まで、それぞれ変化させて求めた  $V$  の値を表-1 に示す。

表-1. 延焼速度 m/分 ( $a$ : 家屋長,  $d$ : 隣棟間隔,  $v$ : 風速)

$a = 5$								
$d \backslash v$	5	10	15	20	25	30	35	
1	1.69	2.85	4.43	6.43	8.86	11.72	15.00	
2	1.67	2.92	4.63	6.83	9.52	12.70	16.38	
3	1.66	2.97	4.80	7.17	10.09	13.56	17.60	
4	1.65	3.01	4.93	7.45	10.57	14.32	18.69	
5	1.64	3.04	5.05	7.69	11.00	14.98	19.65	

$a = 6$								
$d \backslash v$	5	10	15	20	25	30	35	
1	1.86	3.12	4.64	7.02	9.66	12.76	16.33	
2	1.81	3.15	4.99	7.35	10.22	13.62	17.55	
3	1.78	3.18	5.12	7.62	10.70	14.37	18.63	
4	1.76	3.20	5.22	7.86	11.13	15.04	19.60	
5	1.74	3.21	5.30	8.06	11.50	15.63	20.47	

$a = 7$								
$d \backslash v$	5	10	15	20	25	30	35	
1	2.00	3.36	5.20	7.53	10.36	13.68	17.49	
2	1.94	3.36	5.31	7.80	10.84	14.43	18.57	
3	1.90	3.36	5.40	8.03	11.26	15.09	19.54	
4	1.86	3.37	5.48	8.22	11.62	15.68	20.41	
5	1.83	3.37	5.54	8.39	11.95	16.21	21.19	

$a = 8$								
$d \backslash v$	5	10	15	20	25	30	35	
1	2.13	3.57	5.52	7.99	10.98	14.48	18.52	
2	2.06	3.55	5.60	8.21	11.39	15.15	19.48	
3	2.00	3.54	5.66	8.39	11.75	15.74	20.35	
4	1.96	3.52	5.71	8.56	12.07	16.26	21.14	
5	1.92	3.51	5.76	8.70	12.36	16.74	21.85	

$a = 9$								
$d \backslash v$	5	10	15	20	25	30	35	
1	2.25	3.76	5.81	8.40	11.53	15.20	19.43	
2	2.17	3.72	5.86	8.57	11.88	15.79	20.30	
3	2.10	3.69	5.90	8.73	12.20	16.32	21.08	
4	2.05	3.67	5.93	8.86	12.48	16.79	21.80	
5	2.00	3.64	5.96	8.98	12.73	17.22	22.45	

$a = 10$								
$d \backslash v$	5	10	15	20	25	30	35	
1	2.36	3.93	6.07	8.76	12.02	15.85	20.24	
2	2.26	3.88	6.09	8.90	12.33	16.37	21.03	
3	2.19	3.84	6.11	9.03	12.61	16.84	21.75	
4	2.13	3.80	6.13	9.14	12.85	17.27	22.40	
5	2.08	3.77	6.14	9.24	13.07	17.66	23.00	

次に、この3つの変数  $a, d, v$  からなる延焼速度  $V = F(a, d, v)$  において、計画的に操作できると考えられる  $a, d$  の増減が、 $V$  にどのような影響を与えているかを調べるため、 $V$  を  $a$  及び  $d$  で偏微分してみた。

(i) 家屋長  $a$  の影響

(1) 式を (2) のようにおきかえて、 $\partial V/\partial a$  を求めてみる。

$$V = K \cdot \frac{C_1 + a}{C_2 + \frac{3}{8}a} = \frac{8}{3}K + K \cdot \frac{C_1 - \frac{8}{3}C_2}{C_2 + \frac{3}{8}a} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$K = 1 + 0.1v + 0.007v^2 > 0, \quad C_1 = d > 0, \quad C_2 = 3 + \frac{16d}{10+v}$$

$$\frac{\partial V}{\partial a} = K \cdot \frac{\frac{8}{3}C_2 - C_1}{(C_2 + \frac{3}{8}a)^2} \cdot \frac{3}{8} = K \cdot \frac{(C_2 - \frac{3}{8}C_1)}{(C_2 + \frac{3}{8}a)^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $\partial V/\partial a > 0$  のときは  $a$  の増加につれて  $V$  も増加し、逆に負のときは減少する。(3)式において、その正負が問題になるのは分子の  $C_1, C_2$  からなる項であり、それをさらに  $f(d, v)$  とおく。

$$f(d, v) = C_2 - \frac{3}{8}C_1 = 3 + \left(\frac{16}{10+v} - \frac{3}{8}\right) \cdot d \quad \dots\dots\dots (4)$$

これから  $f(d, v) > 0$  になるような  $d, v$  の組合せのときは、 $a$  の増加につれて  $V$  も増加することになり、例えば  $d$  の係数が正、すなわち  $v < 32.67 \text{ m/sec}$  のときは、家屋長の増加につれ延焼速度も必ず増加することになる。

(ii) 隣棟間隔  $d$  の影響

(1) 式を (5) のようにおきかえて、 $\partial V/\partial a$  を求めてみる。

$$V = K \cdot \frac{C_3 + d}{C_4 + kd} = \frac{K}{k} + K \cdot \frac{C_3 - \frac{C_4}{k}}{C_4 + kd} \quad \dots\dots\dots (5)$$

但し、

$$C_3 = a, \quad C_4 = 3 + \frac{3}{8}a, \quad k = \frac{16}{10+v}$$

$$\frac{\partial V}{\partial d} = K \cdot \frac{k}{(C_4 + kd)^2} \cdot \left(\frac{C_4}{k} - C_3\right) = \frac{K}{(C_4 + kd)^2} \cdot (C_4 - kC_3) \quad \dots\dots\dots (6)$$



a の場合と同じく、 $K > 0$ 、 $(C_4 + kd)^2 > 0$  から、(6) 式でその正負が問題となるのは残りの  $C_4$ 、 $C_3$  からなる項で、それを  $f(a, v)$  とおく。

$$f(a, v) = C_4 - kC_3 = 3 + \frac{3}{8}a - \frac{16a}{10+v} = 3 + \left(\frac{3}{8} - \frac{16}{10+v}\right)a \quad \dots\dots\dots (7)$$

従って  $f(a, v) > 0$  となる  $a, v$  の組合せのときは、 $d$  の増加につれて  $V$  が増加することになり、 $a$  の係数が正、すなわち  $v > 32.67$  のときは、どのような家屋長にもかかわらず、隣棟間隔が増加するにつれて必ず延焼速度が増すことになる。

これによると、組合せにより多少の違いはあるにしても延焼速度を低く押えるためには、家屋長を小さくすると同時に隣棟間隔も小さくした方がよいという結論になる。このことは、家屋の隣棟間隔をできるだけあけた方がよいという従来の防火対策の常識と逆行するように考えられるが、これは浜田式における延焼限界距離に満たない 5 m 以下の隣棟間隔の場合に起こる問題である。従って浜田式にもとづく限り、隣棟間隔が延焼防止に効果があるのは、5 m 以上離れている場合であることに注意すべきである。しかし家屋の焼失面積の速度に対しては、次に述べるような関係になっている。

#### B. 隣棟間隔の家屋焼失面積に与える影響

延焼速度が  $V$  m/分のとき、延焼が円形に拡大するとした場合の時刻  $t$  における焼失面積  $S(t)$  は、次の (8) 式で表わされる。

$$S(t) = \pi (Vt)^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

この時、家屋のみの焼失面積は、(8) に建ぺい率  $\delta$  を乗じて次の  $S_a(t)$  で表わされる。

$$S_a(t) = \pi t^2 \cdot V^2 \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで家屋長  $a$ 、隣棟間隔を  $d$ 、風速を  $v$  とすると、建ぺい率  $\delta$ 、及び風下側延焼速度  $V$  は次式で表わされる。

$$\delta = \frac{a^2}{(a+d)^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$V = (1 + 0.1v + 0.007v^2) \cdot \frac{a+d}{3 + \frac{3}{8}a + \frac{16}{10+v}d} \quad \dots\dots\dots (11)$$

(10)、(11) 式で  $d$  の与える影響をみると、建ぺい率  $\delta$  は、 $d$  の増加につれて減少し、延焼速

度  $V$  は前項で述べたように、 $a, v$  の条件によっては  $d$  の増加とともに増えることがある。従って  $\delta$  が減少、 $V$  が増加ということから、 $d$  の増加による  $S_a(t)$  の変化は一意的に決められないように考えられる。しかし (9) 式において  $V^2$  と  $\delta$  を掛け合わせると、両者から  $(a+d)^2$  の項が消去され、残りは (12) 式の分母のみが、 $d$  の関係する項となる。

$$\begin{aligned}
 S_a(t) &= \pi t^2 \cdot V^2 \cdot \delta \\
 &= \pi t^2 \cdot (1 + 0.1v + 0.007v^2)^2 \cdot \frac{(a+d)^2}{\left(3 + \frac{3}{8}a + \frac{16}{10+v}d\right)^2} \times \frac{a^2}{(a+d)^2} \\
 &= \frac{\pi t^2 \cdot (1 + 0.1v + 0.007v^2)^2 \cdot a^2}{\left(3 + \frac{3}{8}a + \frac{16}{10+v}d\right)^2} \dots\dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

次に、(12) 式で、 $d$  を含まない分子の方を  $K$  とおいて、 $S_a(t)$  を  $d$  で偏微分してみる。

$$\partial S_a(t)/\partial d = K \cdot \left(-2 \cdot \frac{16}{10+v}\right) \cdot \frac{1}{\left(3 + \frac{3}{8}a + \frac{16}{10+v}d\right)^2} < 0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

この  $\partial S_a(t)/\partial d < 0$  の関係から、 $S_a(t)$  は  $d$  について減少関数となっていることがわかる。従って、浜田式にもとづく (11) 式で延焼が行われる場合、延焼速度に多少の増加がみられても、家屋焼失面積を少なくするためには、いつも隣棟間隔  $d$  を大きくした方が良いという結論になる。

## 付録 2 出火確率 $P_K(n, r)$ の一覧表

$K$  個の等面積のゾーンに分割された対象地域において、出火地点が全く任意な  $n$  件の火災が予想されるとき、その中の一つのゾーンに、 $n$  件のうちの  $r$  件が発生する確率は次式で与えられる。

$$P_K(n, r) = {}_n C_r \cdot \left(\frac{1}{K}\right)^r \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{n-r}$$

$K$  : ゾーン分割数       $n$  : 全出火件数

$r$  : ゾーン出火件数 ( $r \leq n$ )

ここではこの  $P_K(n, r)$  について、分割数  $K$  が、 $K=2 \sim 10$  の各場合につき、 $n, r$  をそれぞれ  $n=1 \sim 10$ ,  $r=1 \sim n$ , まで変化させた場合の値を示す。

$K=2$

$n \backslash r$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	50.00	50.00									
2	25.00	50.00	25.00								
3	12.50	37.50	37.50	12.50							
4	6.25	25.00	37.50	25.00	6.25						
5	3.13	15.63	31.25	31.25	15.63	3.13					
6	1.56	9.38	23.44	31.25	23.44	9.38	1.56				
7	0.78	5.47	16.41	27.34	27.34	16.41	5.47	0.78			
8	0.39	3.13	10.94	21.88	27.34	21.88	10.94	3.13	0.39		
9	0.20	1.76	7.03	16.41	24.61	24.61	16.41	7.03	1.76	0.20	
10	0.10	0.98	4.39	11.72	20.51	24.61	20.51	11.72	4.39	0.98	0.10

$K=3$

$n \backslash r$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	66.67	33.33									
2	44.44	44.44	11.11								
3	29.63	44.44	22.22	3.70							
4	19.75	39.51	29.63	9.88	1.23						
5	13.17	32.92	32.92	16.46	4.12	0.41					
6	8.78	26.34	32.92	21.95	8.23	1.65	0.14				
7	5.85	20.48	30.73	25.61	12.80	3.84	0.64	0.05			
8	3.90	15.61	27.31	27.31	17.07	6.83	1.71	0.24	0.02		
9	2.60	11.71	23.41	27.31	20.48	10.24	3.41	0.73	0.09	0.00	
10	1.73	8.67	19.51	26.01	22.76	13.66	5.69	1.63	0.30	0.03	0.00

$K=4$

$n \backslash r$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	75.00	25.00									
2	56.25	37.50	6.25								
3	42.19	42.19	14.06	1.56							
4	31.64	42.19	21.09	4.69	0.39						
5	23.73	39.55	26.37	8.79	1.46	0.10					
6	17.80	35.60	29.66	13.18	3.30	0.44	0.02				
7	13.35	31.15	31.15	17.30	5.77	1.15	0.13	0.00			
8	10.01	26.70	31.15	20.76	8.65	2.31	0.38	0.04	0.00		
9	7.51	22.53	30.03	23.36	11.68	3.89	0.87	0.12	0.01	0.00	
10	5.63	18.77	28.16	25.03	14.60	5.84	1.62	0.31	0.04	0.00	0.00

$K=5$

$n \backslash r$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80.00	20.00									
2	64.00	32.00	4.00								
3	51.20	38.40	9.60	0.80							
4	40.96	40.96	15.36	2.56	0.16						
5	32.77	40.96	20.48	5.12	0.64	0.03					
6	26.21	39.32	24.58	8.19	1.54	0.15	0.00				
7	20.97	36.70	27.53	11.47	2.87	0.43	0.04	0.00			
8	16.78	33.55	29.36	14.68	4.59	0.92	0.11	0.00	0.00		
9	13.42	30.20	30.20	17.62	6.61	1.65	0.28	0.03	0.00	0.00	
10	10.74	26.84	30.20	20.13	8.81	2.64	0.55	0.08	0.00	0.00	0.00

K=6

n \ r	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	83.33	16.67	.								
2	69.44	27.78	2.78								
3	57.87	34.72	6.94	0.46							
4	48.23	38.58	11.57	1.54	0.08						
5	40.19	40.19	16.08	3.22	0.32	0.01					
6	33.49	40.19	20.09	5.36	0.80	0.06	0.00				
7	27.91	39.07	23.44	7.81	1.56	0.19	0.01	0.00			
8	23.26	37.21	26.05	10.42	2.60	0.42	0.04	0.00	0.00		
9	19.38	34.89	27.91	13.02	3.91	0.78	0.10	0.00	0.00	0.00	
10	16.15	32.30	29.07	15.50	5.43	1.30	0.22	0.02	0.00	0.00	0.00

K=7

n \ r	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	85.71	14.29									
2	73.47	24.49	2.04								
3	62.97	31.49	5.25	0.29							
4	53.98	35.99	9.00	1.00	0.04						
5	46.27	38.56	12.85	2.14	0.18	0.00					
6	39.66	39.66	16.52	3.67	0.46	0.03	0.00				
7	33.99	39.66	19.83	5.51	0.92	0.09	0.00	0.00			
8	29.14	38.83	22.66	7.55	1.57	0.21	0.02	0.00	0.00		
9	24.97	37.46	24.97	9.71	2.43	0.40	0.04	0.00	0.00	0.00	
10	21.41	35.68	26.76	11.89	3.47	0.69	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00

K=8

n \ r	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	87.50	12.50									
2	76.56	21.88	1.56								
3	66.99	28.71	4.10	0.20							
4	58.62	33.50	7.18	0.68	0.02						
5	51.29	36.64	10.47	1.50	0.11	0.00					
6	44.88	38.47	13.74	2.62	0.28	0.02	0.00				
7	39.27	39.27	16.83	4.01	0.57	0.05	0.00	0.00			
8	34.36	39.27	19.63	5.61	1.00	0.11	0.00	0.00	0.00		
9	30.07	38.66	22.09	7.36	1.58	0.23	0.02	0.00	0.00	0.00	
10	26.31	37.58	24.16	9.20	2.30	0.39	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00

K=9

n \ r	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	88.89	11.11									
2	79.01	19.75	1.23								
3	70.23	26.34	3.29	0.14							
4	62.43	31.21	5.85	0.49	0.02						
5	55.49	34.68	8.67	1.08	0.07	0.00					
6	49.33	37.00	11.56	1.93	0.18	0.00	0.00				
7	43.85	38.37	14.39	3.00	0.37	0.03	0.00	0.00			
8	38.97	38.97	17.05	4.26	0.67	0.07	0.00	0.00	0.00		
9	34.64	38.97	19.49	5.68	1.07	0.13	0.01	0.00	0.00	0.00	
10	30.79	38.49	21.65	7.22	1.58	0.24	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00

K=10		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	r											
1		90.00	10.00									
2		81.00	18.00	1.00								
3		72.90	24.30	2.70	0.10							
4		65.61	29.16	4.86	0.36	0.01						
5		59.05	32.81	7.29	0.81	0.04	0.00					
6		53.14	35.43	9.84	1.46	0.12	0.00	0.00				
7		47.83	37.20	12.40	2.30	0.26	0.02	0.00	0.00			
8		43.05	38.26	14.88	3.31	0.46	0.04	0.00	0.00	0.00		
9		38.74	38.74	17.22	4.46	0.74	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	
10		34.87	38.74	19.37	5.74	1.12	0.15	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

### 付録 3 京都市広域避難計画最終案

この計画は、「京都市における大震災時の避難計画の研究」\*1として、京都市防災会議に提出された資料であり、方法論的には、第2部第2章「京都市広域避難計画」で説明したものと何ら変わりはないが、対象領域、避難地、及び集結方法などに変更、修正した点がある。

#### 1. 避難計画対象地域

避難計画の対象地域には、鴨川以東の地区も一部加えており、また同一の目的避難地を持つ避難単位には、元学区を考えたので、全体で70地区（ゾーン）からなる地域が対象となった。（図-1参照）

要避難人口は、夜間人口をもとに算定しており、総数で393,594人となった。また避難地に直接隣接している地区の人々は、そこに優先的に避難させることにしている。

#### 2. 広域避難地

広域避難地は、図-1、及び表-1に示す6ヶ所に限定しており、その安全区域には、周辺の木造市街地が全面的に火災となった場合でも、輻射熱の影響を受けない区域の面積を採用することにした。また、収容可能人口密度には、「内部通路を含めた全面積に対して平均0.6人/m<sup>2</sup>」を用いた。

\*1 前掲、第2部第2章の文献11)を参照。

図-1 京都市避難計画図

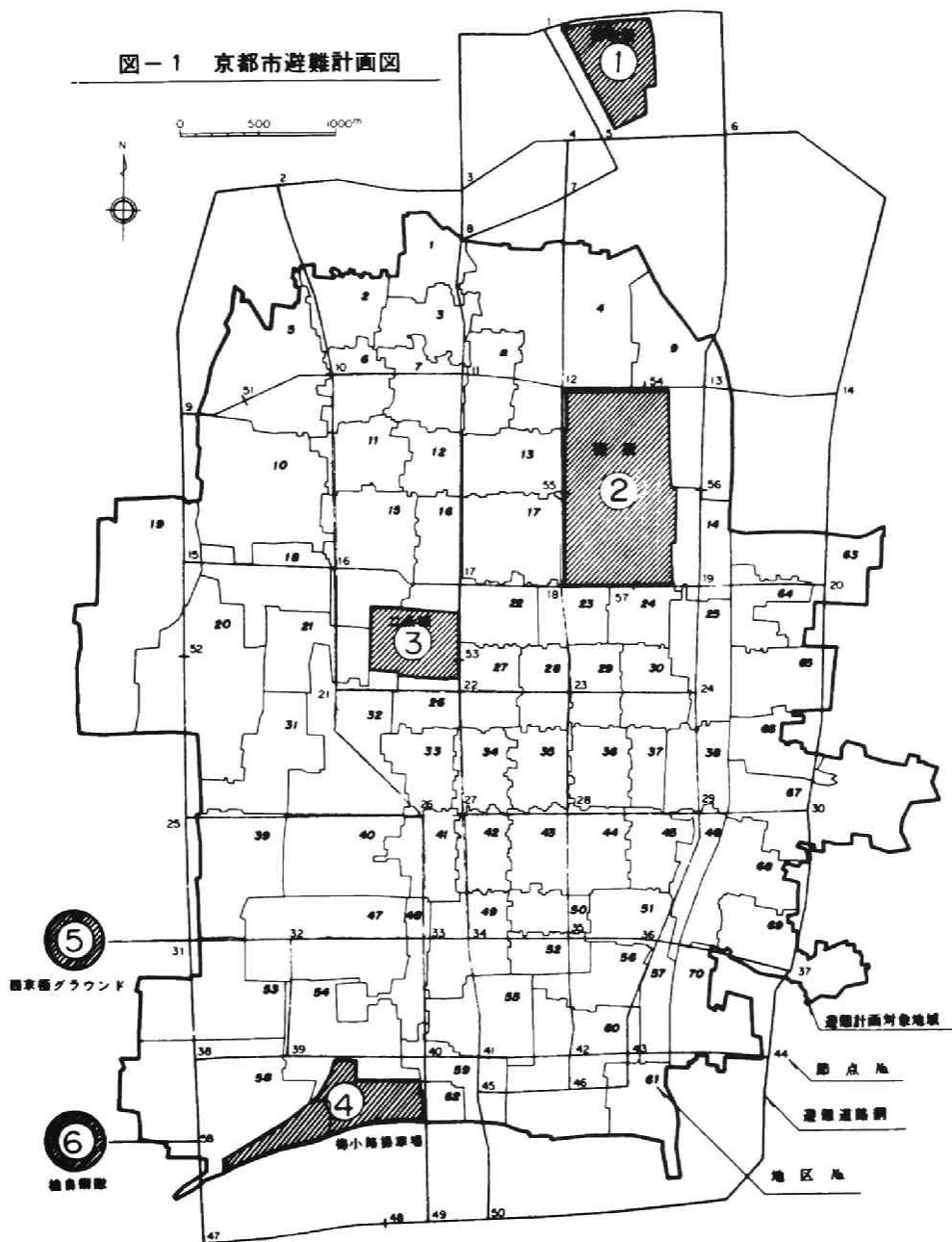


表-1 広域避難地

No	広域避難地名	全体の概略面積 (ha)	左のうち安全区 域の面積(ha)	収容可能人数 (万人)
1	植 物 園	45	6.3	3.78
2	御 所	91	24.7	14.82
3	二 条 城	35	1.7	1.02
4	梅小路操作場	30	24.0	14.40
5	西京極運動場	25	5.4	3.24
6	桂大橋附近河川敷	20	20.0	12.00
合 計		246	82.1	49.26

## 3. 各地区内要避難者の集結状況の計算法

避難の最小単位を元学区に広げたので、各地区内の要避難者全員が一定の節点に集結する状況については、次のような仮定のもとに下記の計算方法で求めることにした。

<仮定>

- (1) 地区内要避難者は、各地区内に一様に分布しているものとし、その人口密度  $\rho$  (人/m<sup>2</sup>) は一定とする。
- (2) 面積  $A$  m<sup>2</sup> なる地区の代りに等面積の円形を仮想する。従って円の半径  $r$  は、 $\pi r^2 = A$  から  $r = \sqrt{A/\pi}$  で与えられる。
- (3) 要避難者は、まず距離  $x$  を通って円の中心  $C$  に向かい、次に距離  $D$  を通って最寄りの節点(ノード)に出ていくものとする。

以上の関係は図-2 のようになる。次に、地区内の人口を  $N$  人とした時、その  $i$  番目の人 ( $i = 1 \sim N$ ) には、中心  $C$  までの距離  $x_i$  が以下の方法で与えられる。

まず、中心からの距離に長さ  $x$  を持つ人数  $n_x$  は、図-3 から (1) 式で与えられ、従って、ある人  $i$  が、距離  $x$  を持つ確率  $P(x)$  は、 $\rho = N/\pi r^2$  から (2) 式で与えられる。

$$n_x = \rho \cdot 2\pi x \cdot dx \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P(x) = n_x / N = 2x \cdot dx / r^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

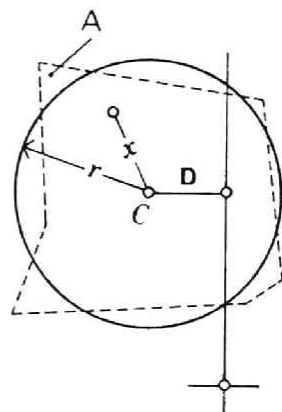


図-2

次に、この  $P(x)$  の累積確率  $f(x)$  は、 $x$  で積分して (3) 式、及び図-4 のようなグラフになる。

$$f(x) = \int_0^x 2x/r^2 \cdot dx = \frac{x^2}{r^2} \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 $R$  を  $0 \leq R \leq 1$  なる一様乱数とすれば、 $i$  番目の人に与えられる累積確率は、 $R_i$  で表わすことができる。故に、(3) 式の  $f(x)$  を  $R$  におきかえ、 $i$  番目の人に与えられる距離  $x_i$  は、次の (4) 式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} x_i &= r \cdot \sqrt{R_i} \\ \text{但し } R_i &\text{ は } 0 \leq R \leq 1 \text{ なる一様乱数} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

なお、この段階での歩行速度は 78 m/分 の一定値としており、合計距離  $(x_i + D)$  をこれで割った時間  $T_i$ 、 $T_i = (x_i + D)/78$  が、節点に出るまでの時間となる。

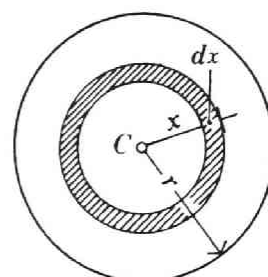


図-3

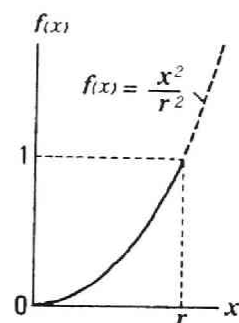


図-4

#### 4. 計 画 解

最適計画モデル (EES + DSD)<sup>\*1</sup> を用いた収束過程は表-2 のようになり、拡大率  $r$  を  $r = 0.10$  にした時に、所要時間が最も短く、さらに総移動距離が最小となる収束解が得られた。

表-2 最適収束解を求める計算 ( $r$  を変化させた場合)

ケース (回数)	係 数 $r$	所要避難時間	備 考
(1)	—	102 分	
(2)	0.05	101 分	
(3)	0.10	100 分	最適解に決定
(4)	0.20	105 分	

この時の、各地区ごとの最適避難経路、及び目的避難地を表-3、及び図-5 に示す。また、参考のため、本計画による各目的避難地ごとの収容人員数、及びその場合の人口密度を表-4 に示す。

\*1 第2部第2章3の3-3を参照。



表-3 地区別・目的避難地及びそれに至る経路（経路節点No）

地区No	地区出口節点No	経路節点No	避難地入口節点No	目的避難地No	地区No	地区出口節点No	経路節点No	避難地入口節点No	目的避難地No
1	8	3・4	5	1	36	23		18	2
2	2	3・4	5	1	37	23		18	2
3	8	3・4	5	1	38	24	19	57	2
(4)	12		12	2	39	32		39	4
5	10	11	12	2	40	32		39	4
6	11	8・3・4	5	1	41	33		40	4
7	11	8・3・4	5	1	42	34		40	4
8	11	8・3・4	5	1	43	35	34・41	40	4
(9)	54		54	2	44	35	34・41・40・39・38	58	6
10	15	52・25・31・38	58	6	45	36	43・42・41・40・39・38	58	6
11	10	11	12	2	46	29	24・23・22	53	3
12	11	8・3・4	5	1	47	32		39	4
(13)	55		55	2	48	40		40	4
(14)	56		56	2	49	34	41	40	4
15	17		18	2	50	34	41	40	4
16	17		18	2	51	35	34・41	40	4
(17)	55		55	2	52	42	41	40	4
18	15	52・25・31・38	58	6	53	31		31	5
19	25		31	5	(54)	39		39	4
20	25		31	5	55	41		40	4
21	16	17	18	2	56	42	41	40	4
22	18	55・12・7	5	1	57	43	42・41	40	4
(23)	18		18	2	(58)	39		39	4
(24)	57		57	2	(59)	40		40	4
25	19		57	2	60	42	41	40	4
(26)	22		53	3	61	46	45・41	40	4
(27)	53		53	3	(62)	40		40	4
28	23	18・55・12・7	5	1	63	20	19	57	2
29	23		18	2	64	19		57	2
30	24	19	57	2	65	24	19	57	2
31	26	33	40	4	66	30	29・24・19	57	2
32	26	33	40	4	67	30	29・24・19	57	2
33	26	33	40	4	68	29	24・19	57	2
34	27	26・25・31・38	58	6	69	37	44・43・42・41	40	4
35	27	26・25・31・38	58	6	70	43	42・41	40	4

（注） 地区Noに（ ）を附した地区は、目的避難地の隣接地区として、あらかじめ指定された地区。

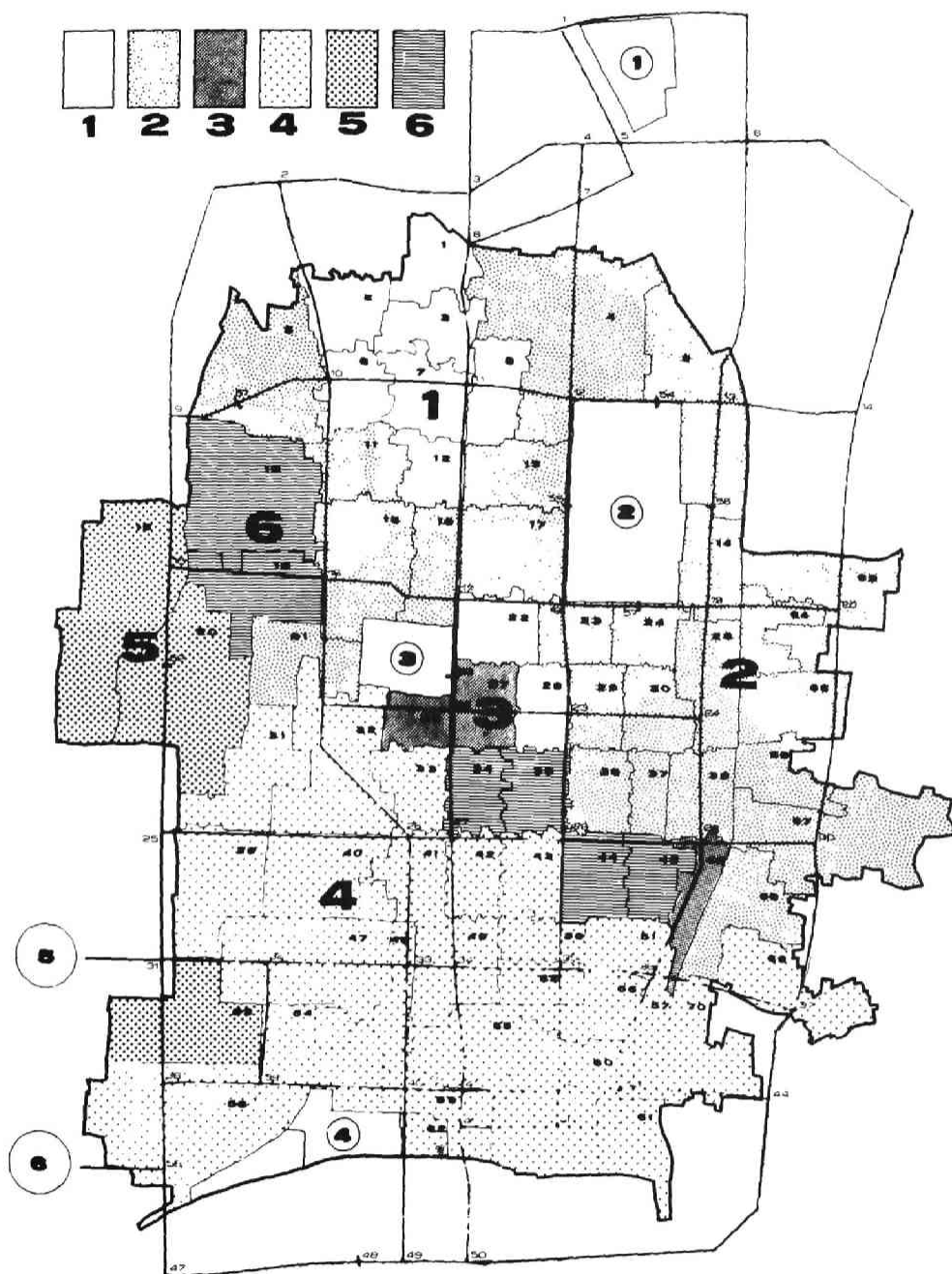


图-5 目的避難地別地区区分

表－4 広域避難地別・収容（計画）人数及び人口密度

No.	広域避難地名	安全面積 (収容可能面積) ( $\text{m}^2$ )	本計画による収容 予定人数 (人)	本計画による収容 時の人口密度 (人/ $\text{m}^2$ )
1	植 物 園	63,000	37,714	0.598
2	御 所	247,000	132,542 (内 41,833)	0.536
3	二 条 城	17,000	9,593 (内 7,479)	0.564
4	梅小路操車場	240,000	143,744 (内 25,836)	0.599
5	西京極運動場	54,000	31,036	0.574
6	桂大橋附近河川敷	200,000	38,965	0.195
	合 計	821,000	393,594	—

(注) (内 ………) は、各避難地に直接隣接する地区で、あらかじめその避難地へ避難することに定められている人数を内数として掲げたもの。

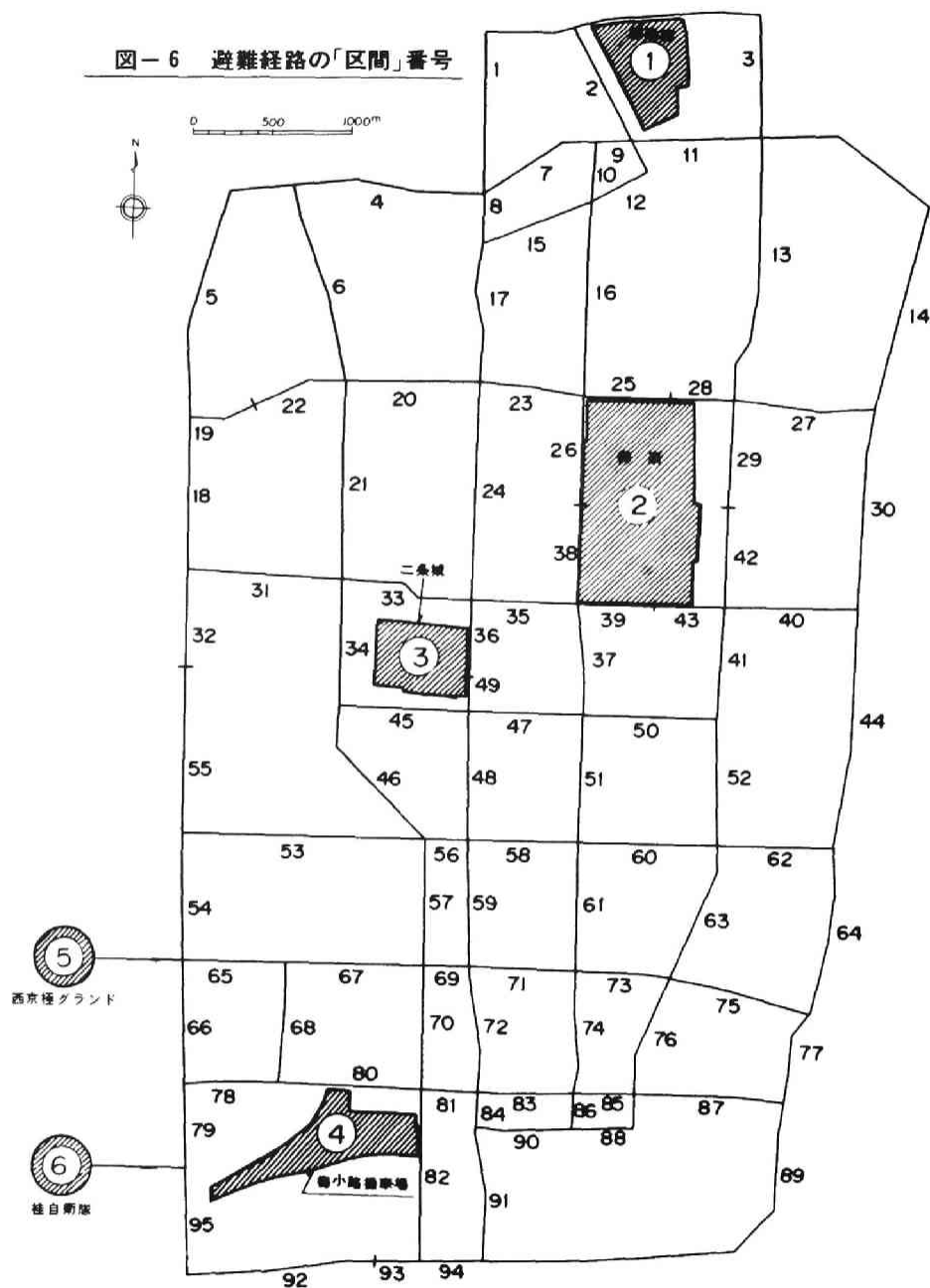
次に、この最適避難経路を通して避難した場合の道路の混雑状況を示すため、各区間を通行（渋滞）の中の避難群集の概略数を、時間1分刻みに表示したものが、表－5、及び図－6である。なお表－5では、5000人を1単位として表示してある。

この避難計画でも、図－5で明らかなように、避難地相互間の中間に位置する地区が、例えばNo.22, 28が植物園へ、No.46が二条城へ、またNo.10, 18, 34, 35, 44, 45が桂大橋附近へ、それぞれ遠距離を避難しなければならないことになった。これらの「不適当さ」を取除くためには、二条城避難地の収容能力を増大するとともに、現在は欠除している北西部と南東部にも広域避難地を新設するなどの対策が必要となろう。

〔印字なしの欄は0人（通行人なし）の区間を示す〕

- 131 -

図-6 避難経路の「区間」番号



## 付録4 リアルタイムシステムによる最短経路選択モデル

### 1. 概 説

#### (1) 目 的

このモデルは、G.D (Graphic Display) 装置の CRT (Cathode Ray Tube) 上に都市の道路網を表示し、任意の2点を指定すると、その間の最短距離及び経路が即時得られると共に、区間の状態変化にも直ちに対応できるシステムを目的として、作成したものである。

#### (2) 応 用

このシステムは、最短経路問題を含む種々の交通計画に適用できるが、混雑、渋滞、及び不通箇所などの情報を随時入力できて、その変化に応じた最短経路をすぐさま CRT 上に得られることから、地震等の災害によりネットワークに変化が生じた場合の避難地の指定や、消防、警察などの緊急活動に役立つものと考えられる。

#### (3) システム構成

モデルは、D.P (Dynamic Programming) の手法により2点間の最短距離を求める部分と、その経路を CRT に表示する部分から成っているが、システムとしては、G.D 装置等のハードウェアと一体となった形で構成されている。すなわち、I-O (Input-Output) はネットワークの初期値以外はすべて G.D 装置を介して行われ、データのインプットにはライトペン及び文字のキーボードを、また各ジョブステップへの移行にはファンクションキーを用いており、アウトプットは全て CRT に表示される。

### 2. ジョブフロー及び操作

ジョブは、図-1に示すように全体で4つのステップからなり、各ステップの概容は次の通りである。

#### (1) STEP 0

このシステムの初期状態で、ノード間の通常距離、及び CRT 上に表示するための座標をカードから読み込んだ後、各ノードにエレメント名を与えて、図-2のネットワークをディスプレイする。STEP 0は、この段階で“命令待ち”の状態となり、以下の1～3のステップへの移行はファンクションキー（以下 F.K と略す）の操作で行われ、それらのステップのジョブが終了すると、再びこの段階に戻ってくる。なお、F.K 32を押すとJOB ENDとなる。

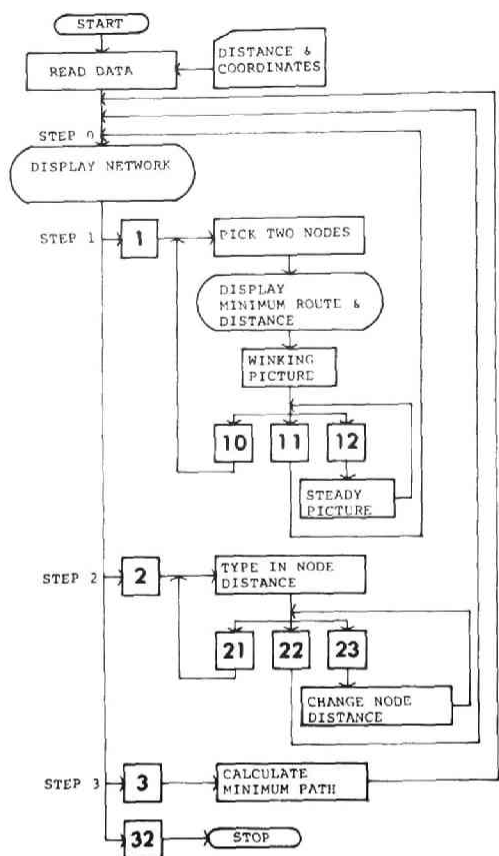


図-1 ジョブフロー

## (2) STEP 1

STEP 0で、F.K1を押すとSTEP 1に入る。ここでは、ネットワークの任意の2点をライトペンでピッキングすると、その間の最短距離を画面の左上に表示し、リンクで結んだ最短経路を明滅させて示す(図-3)。次に、F.K12を押すと静止した画面(輝度は上がるが明滅しない)となり、F.K10を押すとこのSTEP 1の初期状態に戻って、新たな2点の最短経路をディスプレイすることができる。また、F.K11を押した場合には、STEP 0の状態に戻ることになる。

## (3) STEP 2

このステップでは、ノード間の距離の変

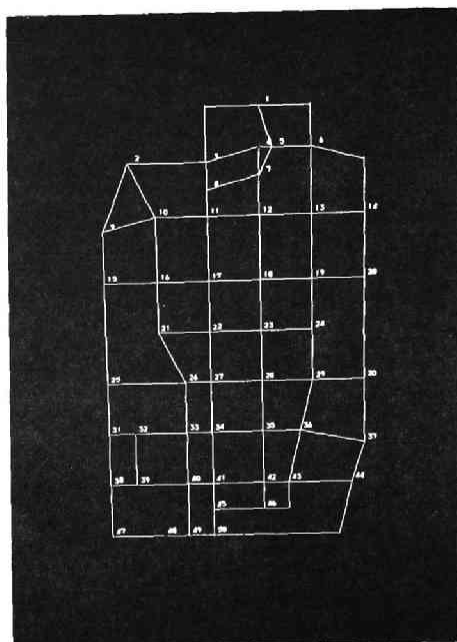


図-2 ネットワーク

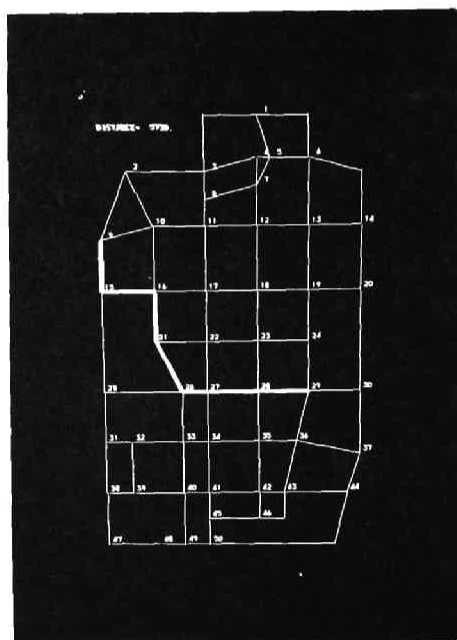


図-3 最短経路

更を扱っており、STEP 0からはF.K 2を押すことにより移行する。変更箇所のノードコード及び距離は、文字キーボードを用いて打込んでおり、インプットされると画面の下方に、図-4のように表示される。もし誤ったデータを打込んだ場合には、F.K 21を押すとリセットされ、この操作は消去されて以前の距離が再び入る。F.K 23を押すと、タイプインした値でもって指定の区間の距離データを変更し、このSTEP 2の初期状態に戻る。文字キーによるタイプインとF.K 23の操作を繰返すと、同時に何ヶ所もの変更が可能となり、最後にF.K 22を押すとSTEP 0の初期状態に戻る。

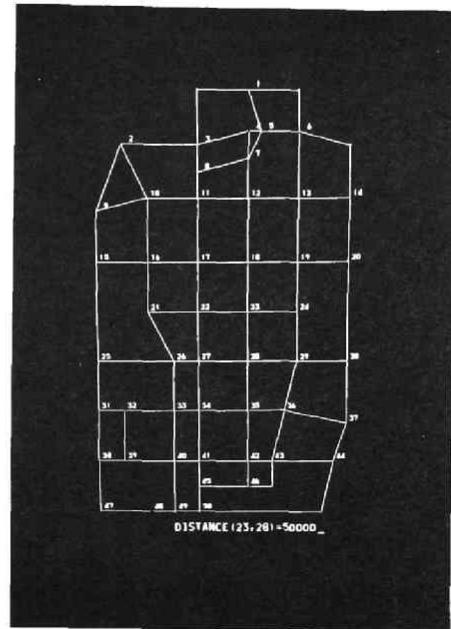


図-4 距離の変更

#### (4) STEP 3

このステップは、STEP 0でF.K 3を押すことにより移行し、STEP 2で変更された距離データに基づいて、ネットワークのすべてのノード間の最短距離を計算している。計算が終了すると、自動的にSTEP 0の段階に戻るが、その際には完了コードとしてF.K 5が点灯され、次の操作に移れることを知らせている。なお、この演算時間は、FACOM 270-30を用いた場合、50個のノードで約20秒を要した。

### 3. 最短経路選択のアルゴリズム

任意の地図の最短経路を求める問題は、逐次近似法を用いて、以下に述べるようにして解法される。

地図に、1, 2, 3, ..., Nとラベルが付けられたN個の交点があるとき、 $t_{ij}$ を、iとjとの間に存在する直接の辺の距離とすれば、点iから点Nに至る最短距離 $f_i$ は、次式を満足する。

$$\left. \begin{aligned} f_i &= \min_{j \neq i} (t_{ij} + f_j) \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \\ f_N &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

なお最小値は、点iから直接行けるすべての点jについて検討する。

この $f_i$ は、次の規則に従って実行される逐次近似法により求められる。



① 初期値  $f_i^{(1)}$  を次のように定める。

$$\left. \begin{aligned} f_i^{(1)} &= +\infty & i &= 1, 2, \dots, N-1 \\ f_N^{(1)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

②  $f_i^{(1)}$  から  $f_i^{(2)}$  を計算するなど、一般に  $f_i^{(k-1)}$  から  $f_i^{(k)}$  を次の回帰関係を用いて計算する。

$$\left. \begin{aligned} f_i^{(k)} &= \min_{j \neq i} (t_{ij} + f_j^{(k-1)}) & i &= 1, 2, \dots, N-1 \\ f_N^{(k)} &= 0 & k &= 2, 3, \dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

このようにして求められる  $f_i^{(k)}$  は、頂点  $i$  から頂点  $N$  に至るたかだか  $(k-1)$  本の辺をもつ経路に関する最短距離となる。

この証明は、数学的帰納法を用いて次のように行われる。

「 $k=2$  のとき、 $f_i^{(2)} = t_{iN}$  であるから、この主張は明らかに正しい。ある整数  $k$  についてこの主張は正しいと仮定する。任意の頂点  $i$  ( $i \neq N$ ) を考え、 $i$  から  $N$  にたかだか  $k$  本の辺で至るすべての経路の集合を  $C_k$  とする。これらの経路の中には直接  $N$  に至るものもある。このときの経路の距離は

$$t_{iN} = t_{iN} + f_N^{(k)}$$

である。 $C_k$  に属する他の経路は、 $i$  から、ある頂点  $j$  ( $i \neq j \neq N$ ) を通って  $N$  に至る。 $i$  と  $j$  を固定して考えれば、全距離は、 $j$  から  $N$  に至る経路がたかだか  $(k-1)$  本の辺を持つ最適のものであるとき、すなわち仮定によりその距離が  $f_j^{(k)}$  である場合に最小となる。したがって、最初に  $j$  を通り、たかだか  $k$  本の辺を持つ最短経路の距離は  $t_{ij} + f_j^{(k)}$  となる。これから、集合  $C_k$  に属する経路で最適なものの距離は、

$$\min (t_{ij} + f_j^{(k)}) \quad (i = 1, \dots, N, \quad j \neq i)$$

となり、定義によりこれは  $f_i^{(k+1)}$  である。以上で、 $f_i^{(k+1)}$  が高々  $k$  本の辺をもつ経路に関する最短距離であることがいえる。[証明終り]\*1

(2), (3) 式で定義される繰返し手順は、計算機に対しては、次のようなアルゴリズムに従ってプログラミングされている。これは一般に、ラベリングアルゴリズム (labelling algorithm)

\*1 文献1) P84 より引用。なお文献1) では「距離」が「所要時間」となっている。

とよばれるものである。

#### 計算手順<sup>\*1</sup>

##### [ステップ1]

最終頂点Nのそばに0を、他の各頂点のそばには $\infty$ を書く。

##### [ステップ2]

N以外の各頂点iについて、 $t_{ij}$ と頂点jのラベルとの和を $j \neq i$ について計算する。これらの和のうち最小のものを $m_i$ とし、記録しておく。

##### [ステップ3]

N以外のすべてのiについてステップ2が終了したら、頂点iのラベルをステップ2で得た $m_i$ に書き換える。

##### [ステップ4]

ステップ2,3にもどり、新しいラベルを計算する。ラベルの更新が起きなくなるまでステップ2,3を繰り返す。

## 4. 実 行

次に、このシステムを用いた経路選択の例を図す。図-5は、ネットワークに何らの障害もない時の[23, 28], [12, 28], [2, 29]の最短経路で、距離はそれぞれ820m, 2850m, 6310mとなった。ここで、区間(23, 28), (27, 28), (28, 29)を通行不能とした場合には、同じ区間の最短経路は図-6のようになり、その距離には、3890m, 5880m, 6520mが得られた。

なお、ここでは区間長に実距離を用いているが、これを時間距離におきかえれば、交通渋滞などによる影響も扱うことができ、さらにそれらネットワークの状態に関するデータをオンライン化して、たえず入力できるようにしておけば、より効果的な利用が可能となろう。

---

\*1 文献1) P86より引用。

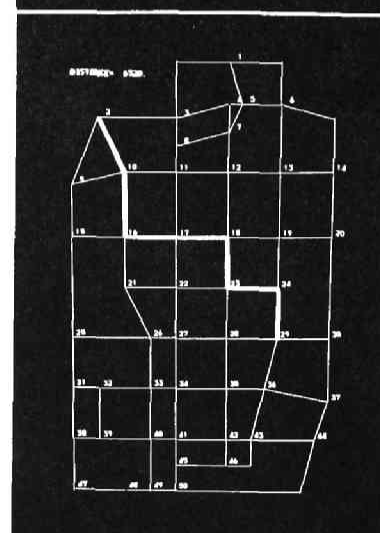
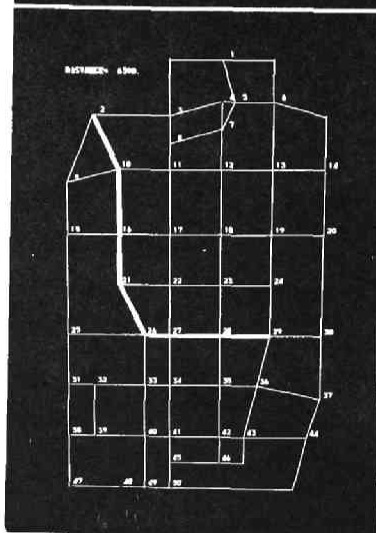
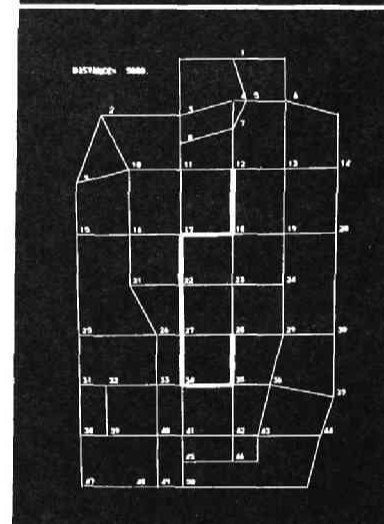
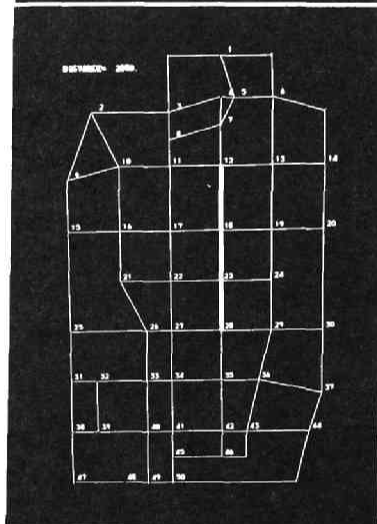
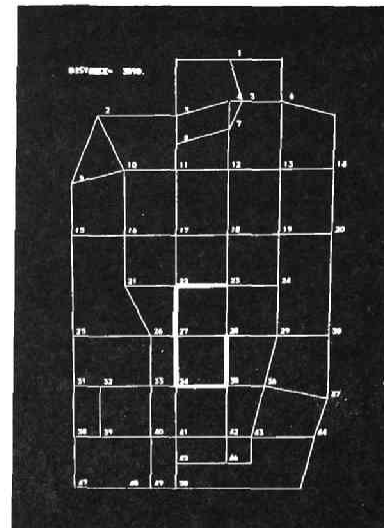
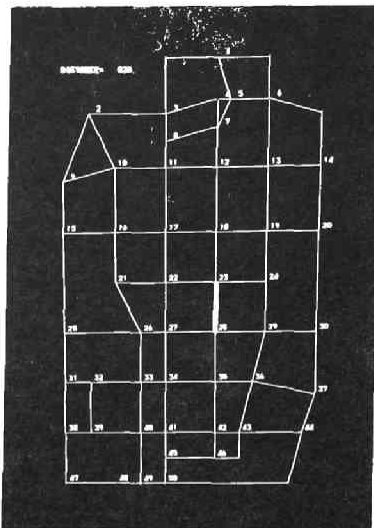


図-5 変更前の最短経路

図-6 変更後の最短経路

## 備 考

このモデルは、京都大学大型計算機センターの、昭和48年当時の SYSTEM III を用いて作成したものであり、その時使用した機器を以下に示すが、現在は別な機種が設置されている。

中央処理装置 FACOM 270-30, CPU

コアメモリー 32Kw, 16 ビット/w

サイクルタイム 900 ns

グラフィックディスプレイ装置 FACOM 6233A

## 参考文献

- 1) R. BELLMAN 他著, 渡辺茂監訳「計算機のためのグラフとアルゴリズム」 共立出版
- 2) 前掲, 第2部第2章文献9)

## 発表論文目次

1. 小林正美「都市再開発方策に関する実証的研究」 京都大学卒業論文 昭和46年2月
2. 天野光三, 古金和雄, 小林正美「都市再開発事業の財源計画に関する一考察」 土木学会関西支部年次学術講演概要 IV-3 昭和46年5月
3. 天野光三, 古金和雄, 小林正美「都市再開発地域における道路網パターンに関する一考察」 土木学会関西支部年次学術講演概要 IV-34 昭和46年5月
4. 天野光三, 古金和雄, 小林正美「財源計画からみた都市再開発の可能性について」 第26回土木学会年次学術講演会講演概要 IV-26 昭和46年10月
5. 天野光三, 古金和雄, 小林正美「京都都心再開発の一提案」 第26回土木学会年次学術講演会講演概要 IV-27 昭和46年10月
6. 宗本順三, 小林正美, 加納修平「梅田ターミナルにおける群集流動シミュレーション(その1, その2, その3)」 日本建築学会近畿支部研究報告集 P169~180 昭和47年6月
7. 小林正美「シミュレーションによる都心の群集流動の解析」 京都大学修士論文 昭和48年3月
8. 宗本順三, 小林正美, 加納修平, 中井 進「梅田ターミナルにおける群集流動シミュレーション(その4, その5)」 日本建築学会近畿支部研究報告集 P105~112 昭和48年6月
9. 堀内三郎, 宗本順三, 小林正美, 中井 進「自然系緑地の容量に関する一考察(その1, その2)」 日本建築学会大会学術講演梗概集 P1173~1176 昭和48年10月
10. 堀内三郎, 小林正美, 中井 進「広域避難計画に関する研究」 都市計画別冊 昭和48年度学術研究発表会論文集 第8号 P207~212 昭和48年11月
11. 堀内三郎, 小林正美, 中井 進「都市域における避難計画の研究」 日本建築学会論文報告集, 第223号 P45~51 昭和49年9月
12. 堀内三郎, 小林正美, 中井 進「都市域における避難計画の研究(その1, その2)」 日本建築学会大会学術講演梗概集 P1323~1326 昭和49年10月
13. 小林正美「シミュレーションモデルによる都市の防災化の研究」 都市計画別冊 昭和49年度学術研究発表会論文集 第9号 P97~102 昭和49年11月
14. 堀内三郎, 小林正美「都市-人間系のシミュレータに関する研究」 日本建築学会近畿

- 支部研究報告集 P 337 ~ 340 昭和 50 年 6 月
15. 堀内三郎, 小林正美, 二村洋一「火災発生密度の回帰分析による研究」 日本建築学会  
近畿支部研究報告集 P 369 ~ 372 昭和 50 年 6 月
  16. 堀内三郎, 小林正美「都市の防災システムの信頼度に関する考察」 日本建築学会大会  
学術講演梗概集 P 1231 ~ 1232 昭和 50 年 10 月
  17. 堀内三郎, 小林正美, 二村洋一「火災発生密度の回帰分析による研究」 日本建築学会  
大会学術講演梗概集 P 1227 ~ 1228 昭和 50 年 10 月
  18. 堀内三郎, 小林正美「火災に対する都市の防災システムの研究, <システムの信頼度に関  
する理論的考察>」 都市計画別冊 昭和 50 年度学術研究発表会論文集 第 10 号  
P 61 ~ 66 昭和 50 年 11 月
  19. 堀内三郎, 小林正美, 二村洋一「火災発生密度の回帰分析による研究」 日本建築学会  
論文報告集 第 240 号 P 121 ~ 126 昭和 51 年 2 月
  20. 堀内三郎, 小林正美「都市防災計画のシステム化に関する研究 (I), <計画の評価に関  
する理論的考察>」 日本建築学会論文報告集 第 242 号 P 73 ~ 79 昭和 51 年 4 月
  21. 堀内三郎, 小林正美, 二村洋一「建築防災計画のシステム分析 (その 1, その 2), <デ  
パートにおける避難シミュレーション>」 日本建築学会近畿支部研究報告集 P 161 ~  
~ 168 昭和 51 年 6 月
  22. 小林正美「建築物における火災時の避難行動シミュレーション」 シミュレーション技  
術研究会論文集 Vol. IV No. 3 P 1 ~ 6 昭和 51 年 9 月
  23. 堀内三郎, 小林正美, 二村洋一「デパートにおける避難シミュレーションの研究 (その  
1, その 2)」 日本建築学会大会学術講演梗概集 P 879 ~ 882 昭和 51 年 10 月
  24. 堀内三郎, 小林正美「シミュレーションモデルによる火災に対する都市の防災システム  
の研究」 都市計画別冊 昭和 51 年度学術研究発表会論文集 第 11 号 P 247 ~ 252  
昭和 51 年 11 月
  25. 堀内三郎, 小林正美, 二村洋一「建築防災計画のシステム分析<デパートにおける避難  
シミュレーション>」 日本建築学会論文報告集 第 251 号 P 57 ~ 63 昭和 52 年 1 月

## SYNOPSIS

### STUDY ON A SYSTEM APPROACH TO A CITY PLANNING FOR THE PREVENTION OF FIRE DISASTERS

by Masami Kobayashi

#### Introduction

This study deals with the methodology of systematization of a city planning for the prevention of fire disasters and the purpose is to establish a rational planning method on the countermeasures against many and simultaneous fires which will occur throughout a city in case of a great earthquake. The features of this study are that the superiority of a plan is evaluated by the reliability of inhabitants' safety whose computation is formulated on the law of probability and that the appropriateness of this formulation is verified by comparing with the safety which is calculated by means of computer simulations.

The thesis is composed of two parts which have three chapters each. Part 1 contains the theoretical studies on a systematization of the planning and a formulation of the safety evaluation. Part 2 shows case studies of Kyoto on the points of a multiple regression of the fire occurrence density, an evacuation planning over a city area, and the safety assumption of a sample district.

#### Part 1 THEORETICAL STUDY ON A SYSTEMATIZATION OF A CITY PLANNING FOR THE PREVENTION OF FIRE DISASTERS

##### Chapter 1 Fire disasters prevention system over a city area (Plan systematization and plan evaluation)

The purpose of this study is to establish an evaluating method of a city planning which aims for the prevention of fire disasters. To this kind of problems, a system approach will be an effective strategy and a plan as a system can be evaluated by the system reliability which is measured by the degree of the fulfillment of its aim. And if a complex system is decomposed into subsystems which are independent each other, the system's optimization as a whole will be possible by accomplishing each subsystem's optimization independently.

In this study we deal with a series of countermeasures against fire disasters as a system and it is composed of the following three subsystems which can function independently in order to assure the safety of inhabitants.

$S_1$  : Prevention of the fire occurrence

$S_2$  : Interception of the fire spreading

$S_3$  : Evacuation of the inhabitants

As a type of system composition, the subsystems  $S_2$  and  $S_3$  form a two-element parallel system and it switches to work when the subsystem  $S_1$  has failed to prevent a fire from breaking out. Therefore the fire disasters prevention system forms a standby redundancy system.

The safety guaranteed by the subsystems  $S_2$  and  $S_3$  is measured by the probability of the state in which people and a fire do not exist together in the same place, and this is calculated by the equation of  $A = T_1 / (T_1 + T_2)$ , where  $A$  is inhabitants' safety,  $T_1$  is mean fire spreading time of an object area and  $T_2$  is mean evacuation time of the inhabitants. This is formulated by solving the differential equations of Markov state transition matrix and coincides with the availability of a single component system with repair which is shown in the form of  $A = MTBF / (MTBF + MTTR)$ , where  $MTBF$  is mean time between failures and  $MTTR$  is mean time to repair.

## Chapter 2 Simulation of the fire disasters prevention system (Safety estimation by simulation)

In this chapter, a simulation model of the fire disasters prevention system is devised and the safety of inhabitants of a district in case of many fires at a time is computed in order to find the key factors that affect the safety.

The simulation model is composed on the conditions of 1) random sampling of a position where a fire breaks out, 2) evacuation based on a simple and instinctive action in emergencies. Because of these characteristics, the states of the fire spreading and the evacuation are simulated separately and the safety of inhabitants is judged by overlapping these outputs afterwards.

The appropriateness of the safety evaluation function,  $A = T_1 / (T_1 + T_2)$  which is formulated in Chapter 1, is ascertained by the close mutual relation between the theoretical safety calculated by the above function and the safety computed by this simulation.

The order of most significant parameters that affect the safety is that the 1st is starting time of escape and the 2nd is fire spreading velocity, and the 3rd is number of fires which spread in the area. This order is obtained by means of a multiple regression of the simulation's outputs.

Dividing a district into blocks by fire resistive buildings is an effective countermeasure to protect people from the danger of fire spreading, and according to the simulation, the effects of this district divisions are prominent when people are late to escape and a fire spreads very rapidly owing to a strong wind.



## Chapter 3 Formulation of safety evaluation

(Safety estimation on the basis of combinatorial theory)

The purpose of this chapter is to show an analytical method that can calculate the fire spreading time of a district when there occur many fires at a time and the one which can estimate the increase of safety when an object area is divided into blocks by firebreaks.

The results can be summarized to the following equations which are formulated on the basis of combinatorial theory assuming a fire to break out at random in the area.

In an object area divided into  $k$  meshes, the expected value of the minimum distance between mesh  $i$  and arbitrary  $n$  meshes in which fires occur can be calculated by the following  $L^i(n)$ , where  $L_m^i$  shows the distance between mesh  $i$  and another mesh  $m$  ( $1 \leq m \leq k$ ) in order of smallness, and  $nCs$  is the combinations of  $n$  things taken  $s$  at a time.

$$L^i(n) = \sum_{m=1}^k L_m^i \left[ \sum_{s=1}^n nCs \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^s \cdot \left(\frac{k-m}{k}\right)^{n-s} \right]$$

And after calculating this  $L^i(n)$  of all meshes and taking its average, the mean fire spreading time of the area is estimated to divide this average distance by the fire spreading velocity.

As for the effects of district divisions, when an area is divided into  $k$  blocks which are equal in size and are surrounded with firebreaks, the probability of  $r$  fires out of  $n$  breaking out in one block is computed by the following  $P_k(n, r)$ .

$$P_k(n, r) = nCr \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^r \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{n-r}$$

Therefore, by using above equations with the safety evaluation function of  $A = T_1/(T_1 + T_2)$  which is formulated in chapter 1, the safety in case of many fires at a time can be estimated analytically.

According to an experimental calculation, if a densely built-up area of wooden houses is separated into blocks of about 700m square each which are surrounded with firebreaks, and the number of fires which will spread in a block is reduced to one, 80% of the inhabitants can evacuate safely though they begin to escape 20 minutes later from the outbreak of the fire which spreads all over the block under the wind of 10 m/sec velocity. Therefore in order to attain the final goal of an incombustible city, it will be an effective countermeasure to improve the firebreaks which consists of roads, greenbelts or fireproof buildings up to the above criterion.

## Part 2 CASE STUDY : KYOTO CITY FIRE DISASTERS PREVENTION PLANNING

### Chapter 1 Fire occurrence density in Kyoto city

(Regression analysis of the fire occurrence density)

This study deals with a regression analysis of the fire occurrence density (number per area)

in Kyoto city. The explanatory variables adopted for the regression are the following three items, 1. land use pattern, 2. population density, 3. building volume-to-land ratio, and the percentage of the incombustible buildings of a district is excluded from them because it has no correlation with the outside variable which is the fire occurrence density. And this outside variable is measured by the sum of three years and corresponding to this, the explanatory variables are measured again by the scale that permits the value fluctuation for the same three years, which means a transformation of the continuous value to the discrete one. In the explanatory variables, the land use pattern is qualitative and because of this data construction, the following two types models are used for the regression and the one which is to have the higher multiple correlation is adopted. They are a model of multiple regression where the land use pattern is qualitative and other variables are numerical and a model of Quantification I (HAYASHI MODEL) where all variables are represented by the response pattern on categories in items.

As a result, the regression of Quantification theory I has got a little higher multiple correlation but the value itself is rather low ( $R = 0.548$ ) and the partial correlation coefficients of the explanatory variables are 1. population density (0.315), 2. building volume-to-land ratio (0.294), 3. land use pattern (0.181). Therefore according to this regression, it is difficult to predict the place at which a fire breaks out and we come to consider that a fire occurs at random.

## Chapter 2 Kyoto city evacuation planning (Emergency escape planning over a city area)

The purpose of this chapter is to show a planning method that can decide a place of refuge for the urban dwellers in case of a great earthquake. That is, the aim of this planning is to appoint an appropriate space and its route for the evacuee so that they can escape from the spread of fires as soon as possible.

Large open spaces in Kyoto city are assigned for the shelters and the optimum distribution of the inhabitants to these spaces is tried without exceeding the number of persons admitted to each space.

A simulation model devised for this planning consists of the following three parts.

### (1) EES (Emergency Escaping Simulation model)

This is a sort of a pedestrian flow simulation model and the state of escaping on a networked-city can be simulated.

### (2) DSD (Destination Searching Dynamic model)

In this model, the destination space of each residential zone is decided so that the total move ( $\Sigma \text{ person} \times \text{distance}$ ) should become the smallest under the limits condition of maximum space

capacity ( $0.5 \text{ person/m}^2$ ).

### (3) Optimum planning model

Above two models are combined at this stage and besides the distance, the time lag due to the traffic congestion on the way is taken into consideration to get the optimum solution. And the convergent solution as the best planning is to have the *minimum* evacuation time and move, satisfying the spaces condition.

By using a Cathode Ray Tube connected to a computer, the output of this simulation is displayed graphically and the state of evacuating in each time can be observed visually, which is stored in 16mm films.

## Chapter 3 Kyoto Sanjo district safety estimation simulation

In this chapter, a case study of the safety estimation is simulated on a sample area in Sanjo district of Kyoto. And the verification of the safety evaluation function and the sensitivity analysis of the parameters are also tried by means of a regression analysis.

The simulation model is almost the same with the one stated in chapter 2 of Part 1, except that the spreading of a fire is simulated according to the velocity formulated by Dr. Hamada.

The input data for this simulation are predicted by a regression and statistics. The number of fires which will spread in the sample area ( $700\text{m} \times 800\text{m}$ ) by the earthquake of magnitude 6.5 in the evening of a winter day ranges between 0.5 to 2.5 because of the difficulties in prediction. And according to the statistics of the winter wind in Kyoto city for ten years, the mean maximum velocity is  $9.2\text{m/sec}$  and the most frequent direction is north-west, and these data have naturally the probable fluctuations.

As a result of this simulation, if the fire breaking out positions are selected at random, the output safety is to cover the deviation which is caused by the probable fluctuations of the fire occurrence number and the wind. The appropriateness of the safety evaluation function is also ascertained by this simulation. And on the sensitivity analysis, the partial correlation coefficients of the factors which affect the safety of the inhabitants are 1. wind velocity ( $-0.94$ ), 2. number of the spreading fires ( $-0.85$ ), 3. announcement time of an evacuation order ( $-0.66$ ).

## Conclusion

As the countermeasures against many fires at a time in a great earthquake, it will be an effective strategy to divide an area in which wooden houses are densely built-up into small blocks surrounded with firebreaks. In addition to this, for the final goal of a defensible city, it's also necessary to place a space of refuge within the each individual block in which all the inhabitants of the block can be

evacuated safely, and as the result, it is expected that the evacuation over a city area should become a preliminary countermeasure. That is, to deal with a large problem of the fire disasters preventing planning over a city area, it is better not to grasp it as a large system as it is which will become complicated and have much indeterminacy, but to divide it into the problems of subsystems which are independent each other and whose object is related directly to the attainment of the total aim.

This means that on the problems of human safety, it is important to set a system in a small domain and make its composition as simple as possible, which will be a clue to produce a steady solution that stands long use.

### **Acknowledgement**

The author would like to thank Dr. Saburo Horiuchi, professor of Kyoto Univ., for the continuing guidance and encouragement during the course of this work. The author also would like to thank Dr. Kozo Amano, professor of Kyoto Univ., for his helpful suggestions and observations.

